



UNIVERSITAT_{DE}
BARCELONA

Impacte del canvi climàtic sobre el recurs eòlic

Autor: Elena López Martí

Tutor: Yolanda Sola Salvatierra

Curs acadèmic: 2019-2020

Màster en Energies Renovables i
Sostenibilitat Energètica

Dos Campus d'Excel·lència Internacional:



Abstract

The wind resource is a valuable engine for the renewable energies' industry. In the scope of Spain, it is competitive even with fossil fuels (it is the renewable technology with more capacity installed). However, due to climate change, wind resource may variate in locations where a wind farm is installed. This project is about the study of the variation of the wind speed ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) within the four scenarios (RCP 2.6, 4.5, 6 and 8.5) presented in the last IPCC report in 2013. For the task, wind speed at 10 m from the surface database from different global climatic models are manipulated and converted into wind speed at 90 m from the surface.

The study takes data from nine locations spread all over the globe with different characteristics. In order to draw a comparison between five different time periods, five Weibull distributions are depicted for each representative concentration pathway (RCP) in each emplacement. Thus, each the location is perfectly characterized and values for available power per area, $\langle P_d \rangle / A$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), and wind speed at 90 m, $\langle v_{90} \rangle$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), are given. Variation within the 20 years' periods from XXI century (with the same reference period 1970-2005) of these variables are calculated in percentile for each location.

The study shows that the variation of wind resource does exist but it is not extremely relevant (usually its order is not higher than 1%) and thus, it does not affect the viability of an already constructed wind farm (it will not become obsolete).

However, some limitations are found due to the methodology carried out. Regional models should have been used instead in order to have a better resolution of the location plus more exact wind speed values. Extreme phenomena are not studied in here therefore, gusts of wind are not considered even though they are highly important. Their occurrence can increase because of climate change and it can endanger wind turbines availability and the whole wind farm if constructed.

Agraïments

Amb la finalització d'aquest treball tanco (de moment) una etapa de 22 anys d'estudis continuats, m'agradaria dedicar aquest últim treball a totes aquelles persones que m'han recolzat i m'han acompanyat al llarg de tot aquest camí.

Inicialment, gràcies a la Yolanda, la meva tutora d'aquest estudi per la paciència la dedicació, el seguiment setmana rere setmana, les hores invertides en videotrucades i per haver facilitat les coses en plena situació excepcional de confinament. Sense la teva ajuda i la teva perspectiva aquest treball no hauria sigut possible. M'ha agradat molt poder trobar en aquest treball, el link entre el canvi climàtic i una energia renovable.

A la meva família, Mama, Papa i Oriol per haver aguantat un confinament i un estat d'alarma de gairebé tres mesos sense que ningú s'hagi volgut tirar pel balcó i pels ànims finals.

Al Pau, per ser el meu complement, el Jing i el Jang i estar sempre segur de que tot es pot fer amb esforç.

A miña amiga Emma por estar siempre alí preguntandome qué tal estou e a pesar de la distancia mantenerse en contacto conmigo. Quérote e echote de menos.

A la Andrea por ser siempre el punto de apoyo aun estando en otro continente y ayudarme con el inglés. You are the best, sister.

Per últim, m'agradaria agrair a l'Alejandro per estar sempre al meu costat i haver-me ajudat sempre que li he demanat. Gracias por la paciencia que has tenido leyendo los parrafos sueltos que te iba enviando y todas las tardes faenando juntos para que me concentrara mejor. Te quiero.

Índex

1	Motivació del projecte	1
2	Introducció	2
2.1	Canvi climàtic	2
2.2	Models	5
2.2.1	Escenaris futurs	5
2.3	Mitigació i energies renovables	7
2.4	Recurs eòlic	8
3	Objectius	10
4	Metodologia	11
4.1	Simulacions dels models climàtics seleccionats	11
4.2	Àrees de l'anàlisi	12
4.3	Càlcul del recurs eòlic	13
5	Resultats i discussió	15
5.1	Comparació i anàlisi dels models	15
5.2	Canvis del recurs eòlic	16
5.3	Limitacions de l'estudi	22
6	Conclusions	24
	Referències	25
	Annexos	I
	Acrònims	I
	Glossari	I
	Recull de resultats gràfics	II
	Taules de resultats	XII

Índex de figures

2.1	Evolució històrica de PIB mundial (\$) i de les emissions GEH (MtCO ₂ equivalent) des de 1850 al 2010. Figura extreta de Deloitte (2016).	2
2.2	Mitjanes mensuals globals de la proporció de mescla respecte a l'aire sec (en parts per milió, ppm, pel CO ₂ i en parts per bilió, ppb, per la resta) mesurades a diferents emplaçaments sobre la superfície marina. Figura extreta de NOAA Research (2020). Figura actualitzada el 21/06/2020.	3
2.3	Comparació entre les dades històriques observades (línia negra) i les simulades en la temperatura global de la superfície terrestre i oceànica (°C) i en el contingut calorífic dels oceans (J) de 1880 a 2012. S'utilitzen dos tipus de modelitzacions, els models utilitzant només forçaments naturals (blau) i models utilitzant forçaments naturals + antropogènics (rosa). Figura extreta de IPCC (2013).	4
2.4	Emissions de CO ₂ (GtCO ₂ equivalents) dels possibles escenaris futurs (RCP) de 1950 a 2100. Figura extreta d'IPCC (2013).	6
2.5	Mitjana global del canvi de la temperatura terrestre (°C) de 2006 a 2100 dels dos escenaris futurs més extrems. Els canvis són relatius al període 1986-2005. Figura extreta d'IPCC (2013).	6
2.6	Evolució dels objectius fixats per la UE per finals del 2020 i 2030. Figura extreta de EEA (2018).	8
4.1	Mapamundi amb les nou localitzacions seleccionades. Vuit localitzacions es troben dins de continent (hipotètica eòlica onshore), i una al mar de Noruega (hipotètica eòlica offshore).	12
5.1	Errors totals de 40 models globals calculats utilitzant totes les mètriques de rendiment. S'identifiquen els models utilitzats en aquest projecte amb un requadre de color rosat. Figura extreta de Kamworapan and Surussavadee (2019).	15
5.2	Representacions gràfiques globals de les diferències de les sortides de les projeccions climàtiques i les simulacions històriques de velocitats de vent a 10 m en un instant determinat.	17
5.3	Distribució de probabilitat de Weibull per quatre localitzacions i escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.	19
I	Representacions gràfiques globals de les diferències de les sortides de l'escenari RCP 2.6 i les simulacions històriques de velocitats de vent a 10 m en un instant determinat. . .	III
II	Representacions gràfiques globals de les diferències de les sortides de l'escenari RCP 4.5 i les simulacions històriques de velocitats de vent a 10 m en un instant determinat. . .	V
III	Representacions gràfiques globals de les diferències de les sortides de l'escenari RCP 6 i les simulacions històriques de velocitats de vent a 10 m en un instant determinat. . .	VI
IV	Representacions gràfiques globals de les diferències de les sortides de l'escenari RCP 8.5 i les simulacions històriques de velocitats de vent a 10 m en un instant determinat. . .	VII
V	Distribucions de probabilitat de Weibull pel Brasil i els quatre escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.	VIII
VI	Distribucions de probabilitat de Weibull pel Congo i els quatre escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.	VIII
VII	Distribucions de probabilitat de Weibull per la costa de Noruega i els quatre escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.	IX
VIII	Distribucions de probabilitat de Weibull pel Mali i els quatre escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.	IX
IX	Distribucions de probabilitat de Weibull pel Kazakhstan i els quatre escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.	X
X	Distribucions de probabilitat de Weibull per Austràlia i els quatre escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.	X
XI	Distribucions de probabilitat de Weibull per Alemanya i els quatre escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.	XI

XII	Distribucions de probabilitat de Weibull pels Estats Units i els quatre escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.	XI
XIII	Distribucions de probabilitat de Weibull per la Xina i els quatre escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.	XII

Índex de taules

4.1	Característiques de les bases de dades amb mitjanes mensuals utilitzades extretes de (ECMWF, n.d.). ϕ correspon a la latitud (en graus) de l'emplaçament.	11
4.2	Informació de les localitzacions escollides per l'estudi (OpenStreetMap contributors, n.d.).	13
5.1	Elecció models d'estudi corresponents a cada escenari RCP.	16
5.2	Coordenades de sortida dels models per cada escenari RCP del model escollit per cada una de les localitzacions.	16
5.3	Resultat del càlcul de la densitat per cada punt geogràfic objecte d'estudi.	18
5.4	Velocitats mitjanes a 90 m d'altura per cada emplaçament escollit, per cada escenari RCP i cada període temporal.	20
5.5	Variació de la potència disponible per unitat d'àrea entre els períodes de 20 anys del segle XXI i el període històric (1970-2005).	21
I	Paràmetres per l'estudi del recurs eòlic dels períodes temporals per cada localització a l'escenari RCP 2.6.	XII
II	Paràmetres per l'estudi del recurs eòlic dels períodes temporals per cada localització a l'escenari RCP 4.5.	XII
III	Paràmetres per l'estudi del recurs eòlic dels períodes temporals per cada localització a l'escenari RCP 6.	XIII
IV	Paràmetres per l'estudi del recurs eòlic dels períodes temporals per cada localització a l'escenari RCP 8.5.	XIII
V	Variació de la velocitat del vent a 90 m d'altura entre els períodes de 20 anys del segle XXI i el període històric (1970-2005).	XIII
VI	Potències disponibles per unitat d'àrea per cada emplaçament escollit, per cada escenari RCP i cada període temporal.	XIV

1 Motivació del projecte

L'objectiu d'aquest treball és connectar el canvi climàtic, un problema preocupant a l'actualitat i que en el futur pot intensificar-se, amb les energies renovables, en concret, l'energia eòlica.

El meu interès i preocupació personal sobre el tema del canvi climàtic em va conduir a realitzar aquest màster, i no podia acabar-lo d'una altra manera que basant el meu treball de fi de màster en aquest tòpic.

Tot i que el canvi climàtic preocupa a la població, durant tot el curs se'ns ha repetit per part del professorat que es presenta un escenari ple d'oportunitats i que la gent de la nostra generació l'hem d'aprofitar. El canvi climàtic podem entendre'l de moltes maneres negatives, però també com un gran detonant del desenvolupament social, econòmic i tecnològic per poder adaptar-nos-hi i mitigar-lo.

No he volgut desaprofitar l'oportunitat de desenvolupar un tema que considero molt important, i és que la mitigació del canvi climàtic i l'adaptació als escenaris futurs va de la mà amb l'aprofitament dels recursos naturals basat en les energies renovables.

D'aquesta manera, el meu treball introdueix el canvi climàtic de manera específica, presenta els quatre escenaris futurs segons l'últim informe d'experts en canvi climàtic del 2013 i aprofita les dades del vent extrems dels models que formen part de la intercomparació CMIP5, segons cada escenari, per analitzar els canvis en el recurs eòlic en zones concretes del planeta.

El següent text és l'últim pas per finalitzar els meus estudis universitaris (de moment), després de sis anys d'aprenentatge continu, i passar a formar part del món laboral. M'agradaria fer una bona feina que aportí una visió de l'impacte que pot significar l'escalfament global en la indústria de les energies renovables i que demostrí la importància que tenen les projeccions dels models climàtics. El canvi climàtic és inequívoc i ens afecta a tots.

2 Introducció

2.1 Canvi climàtic

Al 1988, l'Organització Meteorològica Mundial (OMM) i el Programa de Nacions Unides pel Medi Ambient (PNUMA) funden el Grup Intergovernamental d'Experts en Canvi Climàtic (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) amb l'objectiu d'avaluar tota la informació publicada en matèria de canvi climàtic i publicar una sèrie d'informes sobre l'estat de l'art de la ciència del canvi climàtic des de les bases físiques fins a propostes de mitigació i adaptació (UN, 2019).

Però, quan parlem de canvi climàtic, a què ens referim exactament? L'IPCC ens ofereix una definició molt clara:

El canvi climàtic és un canvi en l'estat del clima que pot ser identificat per canvis en la mitjana i/o la variabilitat de les seves propietats i que persisteix per un període estès, típicament dècades o més. Pot ser causat per processos naturals interns, per forçaments externs i per canvis antropogènics persistents en la composició de l'atmosfera o l'ús del sol (IPCC, 2012).

El canvi climàtic observat no és fruit de la variabilitat natural, sinó que és un canvi forçat per activitats antropogèniques des de l'era pre-industrial, i en especial des de mitjans del segle XX, tal i com l'IPCC reporta al resum del seu cinquè informe (IPCC, 2014): *actualment, és té entre el 95% i el 100% de certesa que els humans són la principal raó de l'escalfament global que està patint el planeta Terra.*

L'escenari socioeconòmic de 1950 està directament associat a les recents guerres mundials patides per la humanitat. El creixement econòmic d'alguns països comença a reflotar, enfortits pel sistema capitalista encara present, i l'activitat de cada país depèn bàsicament d'aquest creixement.

És a partir d'aleshores quan comença la recuperació industrial i, en conseqüència, el producte interior brut (PIB) dels països augmenta. Aquest augment de l'economia ve associat amb una major producció d'energia i de productes i un lleuger increment en l'ús de l'automòbil que anirà creixent més i més amb el pas dels anys. Lligat a aquestes activitats, apareix el creixement imparable (de moment) d'emissions de gasos d'efecte hivernacle (GEH) i aerosols originats bàsicament per combustió de recursos fòssils i biomassa, desforestació i canvi en l'ús dels sòls.

Una bona representació de l'evolució comentada es troba en la Figura 2.1. A partir de 1850, finals de la Revolució Industrial del segle XIX, la humanitat no ha frenat el seu avenç tecnològic, però no és fins al 1950 que la tendència d'aquest creixement associat a les emissions de GEH té un canvi de pendent positiu molt pronunciat.

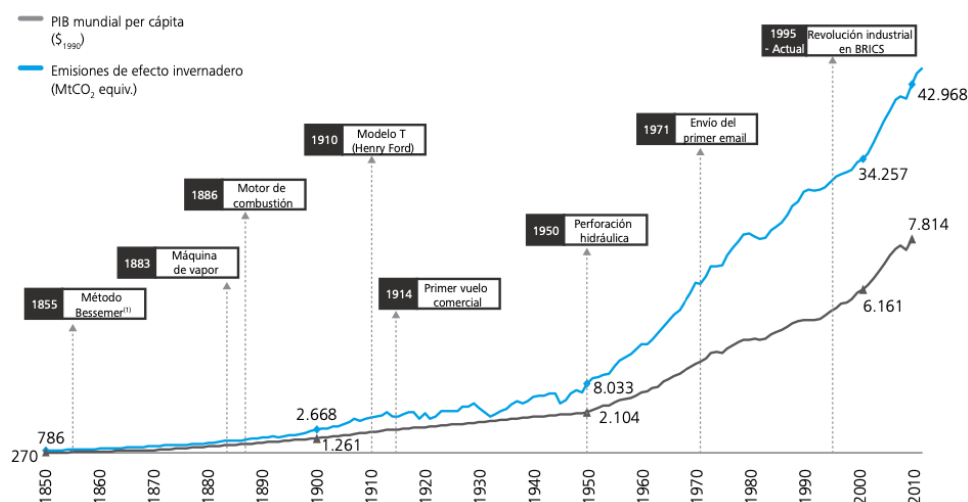
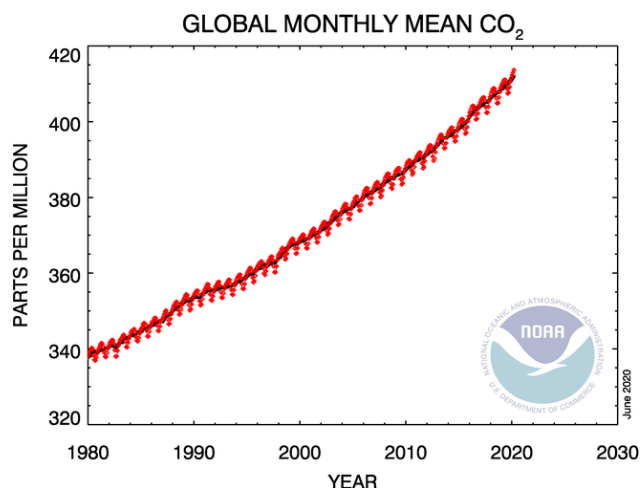


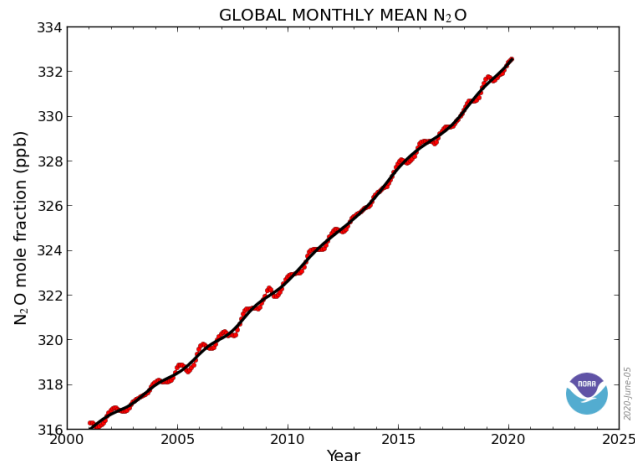
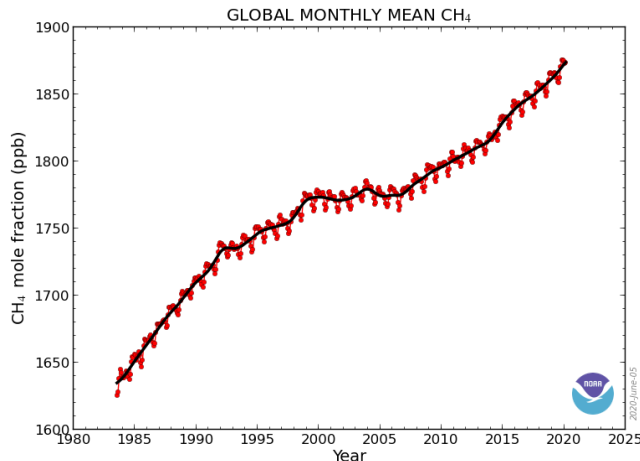
Figura 2.1. Evolució històrica de PIB mundial (\$) i de les emissions GEH (MtCO₂ equivalent) des de 1850 al 2010. Figura extreta de Deloitte (2016).

S'entenen per gasos d'efecte hivernacle, tots aquells gasos que s'alliberen a l'atmosfera mitjançant processos naturals o antropogènics que són capaços d'absorbir la radiació infraroja que emet la superfície terrestre, l'atmosfera i els núvols i d'emetre, també, la radiació infraroja en totes direccions. Això crea un efecte conegut com a efecte hivernacle. Els principals GEH i els que més preocupen són el diòxid de carboni, CO_2 , el metà, CH_4 i l'òxid nítrós o òxid de dinitrogen, N_2O . A més, també preocupa l'augment de vapor d'aigua a l'atmosfera, $\text{H}_2\text{O}_{(g)}$, degut a l'augment de temperatura, ja que dona lloc a realimentacions positives.

La seva tendència evolutiva creixent es pot observar de manera irrefutable en les següents representacions de la Figura 2.2.



(a) Mitjana mensual global de CO_2 (ppm) (1980-2020).



(b) Mitjana mensual global de CH_4 (ppb) (1983-2020). (c) Mitjana mensual global de N_2O (ppb) (2002-2020).

Figura 2.2. Mitjanes mensuals globals de la proporció de mescla respecte a l'aire sec (en parts per milió, ppm, pel CO_2 i en parts per bilió, ppb, per la resta) mesurades a diferents emplaçaments sobre la superfície marina. Figura extreta de NOAA Research (2020). Figura actualitzada el 21/06/2020.

Com a detall destacable, dir que sense l'existència dels oceans la concentració de CO_2 a l'atmosfera seria molt major, ja que al voltant del 30% de CO_2 emès és captat per aquests. En conseqüència els oceans s'han acidificat un 26% (IPCC, 2013).

L'equilibri radiatiu de la Terra es veu alterat degut a forçaments radiatius (FR) que modifiquen el balanç radiatiu del sistema. La pertorbació és provocada per (Sola, 2020):

- Forçaments climàtics.

- Externs al sistema, com la variabilitat solar.
- Interns causats per variacions naturals, com les erupcions volcàniques.
- Interns causats per l'activitat humana, com emissions de GEH i els canvis en l'ús del sòl.
- Realimentacions.
 - Del vapor d'aigua.
 - De l'albedo de gel.
 - De CO₂.
 - Dels núvols.

Els forçaments climàtics interns causats per l'activitat humana són els que modifiquen de manera més extrema el balanç radiatiu. Les tones de GEH que s'emeten cada any a l'atmosfera impliquen canvis directes en la concentració dels gasos variables d'aquesta i en el pH dels oceans, però també desencadenen canvis indirectes.

La imposició d'un forçament climàtic sobre el sistema (la Terra) no només fa fluctuar una variable, sinó que pertorba a molts altres elements dependents degut a la complexitat del sistema climàtic del planeta. Aquests canvis indirectes són deguts a les retroaccions del sistema.

Els GEH són agents de forçament radiatiu i, per tant, alteren el sistema climàtic. El GEH que més ha incrementat la seva concentració a l'atmosfera per culpa de l'activitat antropogènica és el CO₂. Aquest gas existeix naturalment a l'atmosfera com a gas variable i és un dels responsables de l'efecte hivernacle natural, però en el moment en que se superen els nivells normals de concentració passa a actuar com a forçador del sistema: és un forçador climàtic i alhora, un agent realimentador. Tot i que, principalment, el focus està centrat en el CO₂, també s'ha de tenir present la importància de la reducció d'emissions d'altres agents que produeixen forçament radiatiu, com altres GEH i aerosols.

A partir d'observacions podem adquirir coneixements de l'evolució de les variables del sistema climàtic. Les dades han de provenir de diverses fonts, sistemes de mesura i metodologies, a la vegada que han de ser comparables entre elles. Les variacions en la mitjana i la desviació estàndard de les variables i les tendències observades confirmen el canvi climàtic. També es necessita la validació d'aquests canvis a partir de models climàtics on es consideren els forçaments radiatius i es comparen amb les dades històriques corresponents (Figura 2.3).

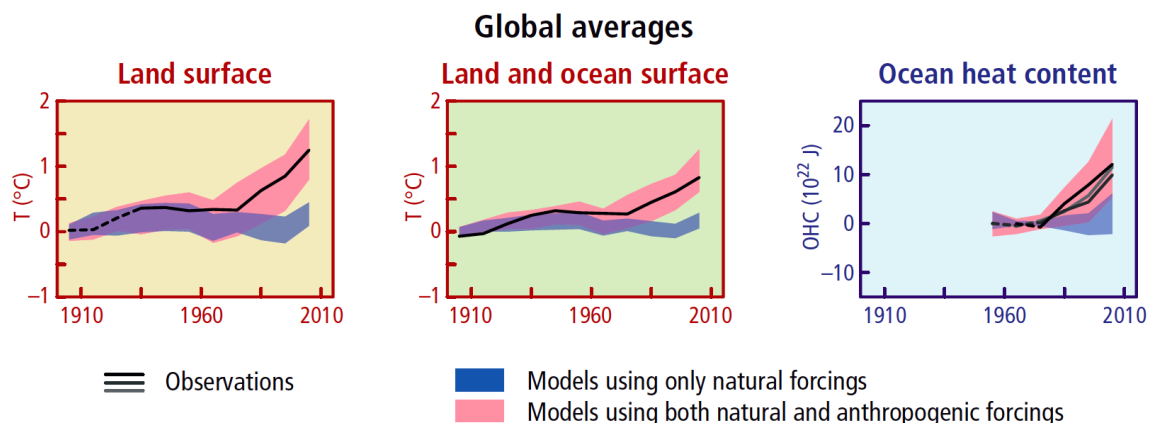


Figura 2.3. Comparació entre les dades històriques observades (línia negra) i les simulades en la temperatura global de la superfície terrestre i oceànica (°C) i en el contingut calorífic dels oceans (J) de 1880 a 2012. S'utilitzen dos tipus de modelitzacions, els models utilitzant només forçaments naturals (blau) i models utilitzant forçaments naturals + antropogènics (rosa). Figura extreta de IPCC (2013).

Es pot veure com les observacions estan en acord amb les simulacions amb forçament natural antropogènic, en canvi, la tendència observada des de mitjans del segle XX no pot explicar-se amb simulacions que inclouen només variabilitat natural. D'aquesta manera, és reafirma la influència de l'ésser humà com a causa directa de l'escalfament global.

2.2 Models

Un model climàtic és una representació simplificada dels processos i interaccions entre els diferents components del sistema climàtic. Els models es fan servir, entre d'altres coses, per a fer projeccions de les variables climàtiques sota diferents escenaris futurs. Serveixen per analitzar agents forçadors del sistema i l'impacte d'aquests. Els models climàtics simplifiquen la complexitat del sistema per mitjà d'aproximacions de processos que es troben fora de la resolució espacial i temporal dels models.

Les projeccions climàtiques són les sortides dels models climàtics que serveixen per preveure escenaris a llarg termini (anys, dècades i segles). Permeten treure conclusions sobre com canviaran les característiques climàtiques respecte les mitjanes actuals de les variables.

Però, són realment fiables els models? Han de ser sempre validats amb observacions i a través de comparacions entre altres grups de recerca per tal de detectar possibles desviacions i errors i corregir-los.

Per aquest motiu, al 1995 el Programa de Recerca del Clima Mundial (WCRP) crea el Projecte d'Intercomparació de Models Climàtics (CMIP) per tal de proporcionar als científics una base de dades robusta de simulacions del Model Global de Circulació (Giusti, 2020).

Durant el període 2008-2012 es desenvolupa el CMIP fase 5 (CMIP5) on s'involucren vint-i-quatre centres de modelació que fan córrer els seus models a partir d'unes condicions fixades (condicions inicials i de contorn): evolució dels forçaments climàtics, factors econòmics, tecnològics, demogràfics i polítics entre d'altres. Uns dels resultats que es pretén extreure del CMIP5 són les tendències de les projeccions climàtiques dels quatre possibles escenaris futurs, coneguts com Trajectòries de Concentració Representatives (RCP) pels quals s'adjudica un valor màxim de forçament radiatiu ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) a finals de segle, any 2100 (Taylor et al., 2012).

Als resultats del CMIP5 se'ls hi ha donat un bon ús. Han jugat un paper molt important en l'extracció de conclusions i verificació d'hipòtesis de l'últim informe publicat per l'IPCC al 2013. Algunes de les conclusions són: *no existeixen precedents de les altes concentracions de CO_2 , CH_4 i N_2O , l'increment d'emissions GEH durant la primera dècada del segle XXI ha augmentat més que durant les tres dècades anteriors.*

2.2.1 Escenaris futurs

L'IPCC ha publicat cinc informes des de la seva creació i actualment s'està treballant per publicar el sisè informe durant l'any 2021. El present treball es basa en el cinquè informe, l'últim publicat. La conclusió d'aquest és inequívoca: *el canvi climàtic és real i les activitats antropogèniques són les seves principals causants (emissions GEH 31% majors al 2010 respecte 1990)* (IPCC, 2013).

Les projeccions mostren les evolucions de diverses variables al llarg del segle XXI a partir dels quatre escenaris (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 i RCP 8.5). Dos exemples representatius els trobem a les Figures 2.4 i 2.5, la segona només representa els canvis de temperatura en els dos escenaris més extrems, obviant que RCP 4.5 i RCP 6 estan compresos entre ambdós límits.

L'escenari amb menys forçament radiatiu a finals de segle (RCP 2.6) serà l'escenari amb menys emissions antropogèniques de CO_2 i, conseqüentment serà l'escenari amb menys increment de temperatura a finals de segle. Aquest és doncs l'escenari més optimista en el qual a mitjans de segle, el planeta hauria de ser un lloc lliure d'emissions de CO_2 i, per tant, la disminució dràstica d'emissions hauria de començar immediatament.

El segon escenari amb menys forçament radiatiu (RCP 4.5) contempla una inicial estabilització de les emissions antropogèniques i posteriorment, una disminució que no arriba al zero a finals de segle, la descarbonització global absoluta no es contempla en aquest escenari.

El tercer escenari (RCP 6) contempla de la mateixa manera que l'anterior, una estabilització inicial en les emissions de CO₂, però posteriorment l'augment no és negatiu sinó positiu, el que implicaria un augment de la temperatura respecte al període 1986-2005.

El quart escenari (RCP 8.5), el més pessimista i dràstic, implica que les emissions antropogèniques de CO₂ no es frenen ni disminueixen en cap moment i, per tant, l'increment de temperatura a final de segle és major a 4°C.

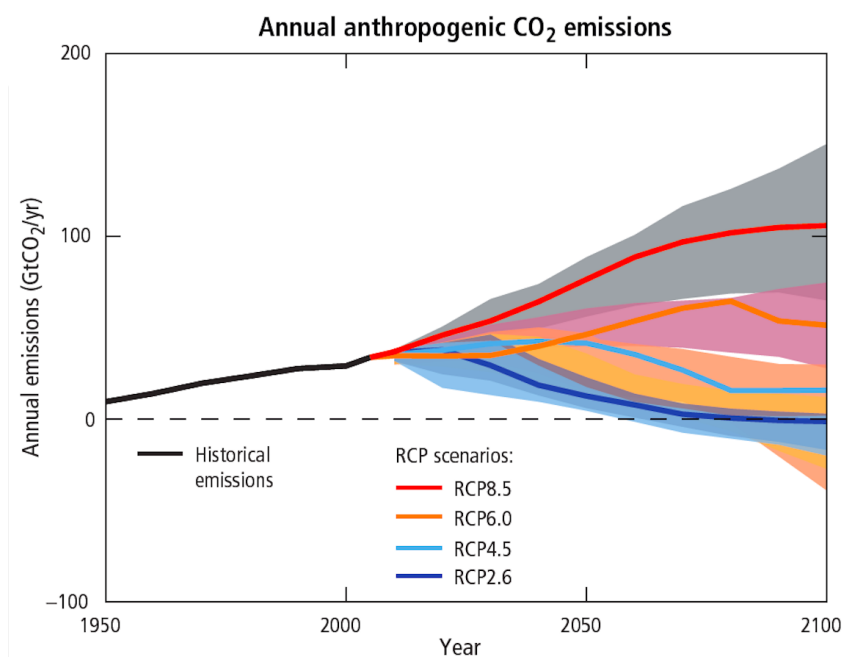


Figura 2.4. Emissions de CO₂ (GtCO₂ equivalents) dels possibles escenaris futurs (RCP) de 1950 a 2100. Figura extreta d'IPCC (2013).

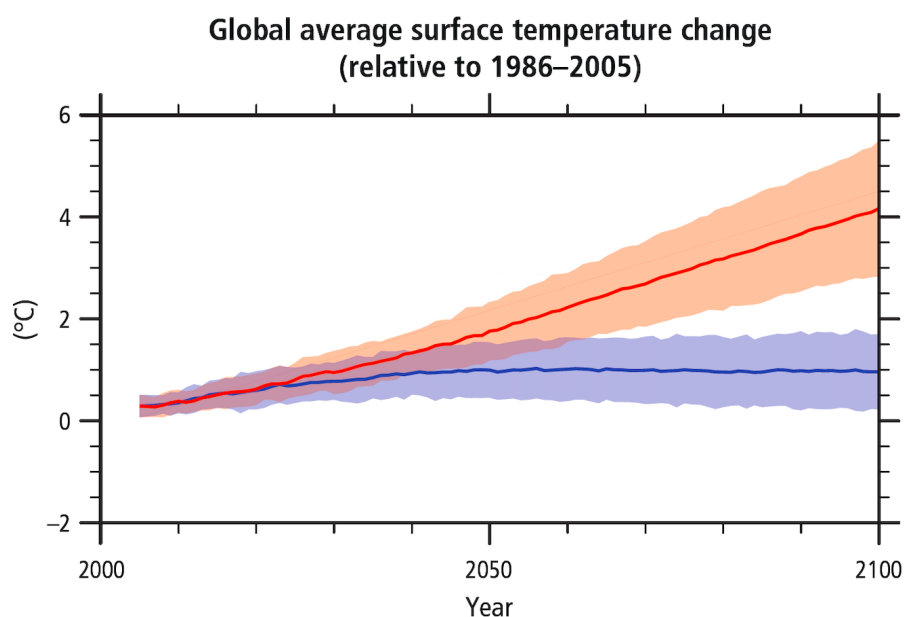


Figura 2.5. Mitjana global del canvi de la temperatura terrestre (°C) de 2006 a 2100 dels dos escenaris futurs més extrems. Els canvis són relatius al període 1986-2005. Figura extreta d'IPCC (2013).

Les amplituds que s'observen a la Figura 2.5 per les dues tendències es deuen a la suma dels resultats de tots els models corresponents a cada escenari i les seves respectives incerteses. No només existeix un únic model que presenta resultats i del qual s'extreu conclusions, sinó que es tracta d'un conjunt de models en el qual tots segueixen la mateixa tendència però s'obtenen diferències que provoquen que l'interval de possibilitats d'escenari futur no sigui un únic valor de temperatura sinó que s'estengui, per exemple de 3°C a 5.5°C en l'escenari menys favorable pel planeta (RCP 8.5) a finals de segle, any 2100.

2.3 Mitigació i energies renovables

La utilització d'energies renovables com a recurs per desenvolupar la mitigació del canvi climàtic arreu d'Europa és un fet i un recurs clau (IPCC, 2011). Gràcies a aquest tipus d'energia, s'aconsegueix reduir les emissions de gasos que propicien l'efecte hivernacle. Se substitueix la generació d'energia a partir de combustibles fòssils per energia provinent dels recursos naturals renovables que ens proporciona el planeta, com ara la radiació solar, el vent, la calor de l'interior de la Terra, el moviment de les onades, l'aigua, etc.

Per tal de reforçar l'aprofitament de les fonts renovables, cal desenvolupar una política energètica que les contempli i consideri. Els instruments jurídics internacionals tenen un rol molt important en aquest aspecte.

L'aparició del Conveni Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic (CMNUCC) al 1992 desencadena una sèrie d'accions de reconeixement del canvi climàtic i inici en la seva mitigació. Actualment el Conveni està ratificat per 197 Parts: 196 de les quals són Estats i la Part restant és una organització regional d'integració econòmica (UNFCCC, 2020).

L'article 2 del mateix document dicta que *es vol aconseguir l'estabilització dels GEH a un nivell que impedeixi posar en perill el sistema climàtic degut a interferències antropogèniques* (UNFCCC, 1992).

El text no parla explícitament sobre les energies renovables, però dins de cada Estat es fa una promoció de les energies renovables. Les Parts han de fer els seus esforços individuals per assolir l'objectiu, i moltes substitueixen els recursos no renovables per recursos renovables en la generació d'energia.

Un punt a destacar del CMNUCC és la distinció entre països desenvolupats i països en desenvolupament. Aquest incís indica que els països desenvolupats han de prestar serveis als que s'estan desenvolupant per tal de que l'objectiu sigui global i no només regional.

Cada any des de 1995, les Parts es reuneixen en la Conferència de les Parts (COP). Al 1997, la COP 3 va redactar el Protocol de Kyoto (COP 3, 1997), el primer text on es quantifiquen objectius de **reducció** i limitació de les emissions de GEH. Però el model de text no acaba de funcionar degut a l'obligació a les Parts de complir un objectiu de cota de reducció d'almenys un 5% imposat, el qual va ser insuficient ja que només 36 països el van ratificar.

Posteriorment al 2015, durant la COP 21 es redacta l'Acord de París (COP 21, 2015). Un text menys exigent que el Protocol de Kyoto que diversifica els objectius, i que té un objectiu global: *No superar la temperatura global a més de 2°C*. Permet que els Estats decideixin per ells mateixos i imposin les seves pròpies directrius i, per tant, els objectius depenen de la voluntat de totes les Parts.

L'última trobada de les Parts, COP 25, es celebra a Madrid durant les dues primeres setmanes de desembre de 2019. Una trobada no gaire prometedora pel que fa a la millora en la mitigació del canvi climàtic, les Parts no es posen d'acord en la lluita contra l'emergència climàtica.

La Unió Europea (UE) està fent esforços per canviar la seva política energètica i proposa uns objectius que actualitza cada dècada per tal de complir l'objectiu de l'Acord de París.

Per finals d'aquest any, es va proposar l'objectiu 20-20-20 (Directiva 2009/28/CE (UE, 2009)) en el qual les emissions GEH han de disminuir un 20% respecte l'any 1990, les energies renovables a

tota la UE hauran de tenir un pes mínim del 20% en el mix energètic i l'eficiència energètica haurà d'augmentar un 20%.

Aquests objectius es compliran a finals d'any. Els objectius actualitzats en la Directiva 2018/2001/UE (UE, 2018) pel 2030, no semblen tan fàcils d'assolir: un dels punts exigeix l'augment del percentatge de participació total de les energies renovables fins al 32% en tota la UE, això és massa ambiciós si les polítiques actuals no canvien (Figura 2.6).

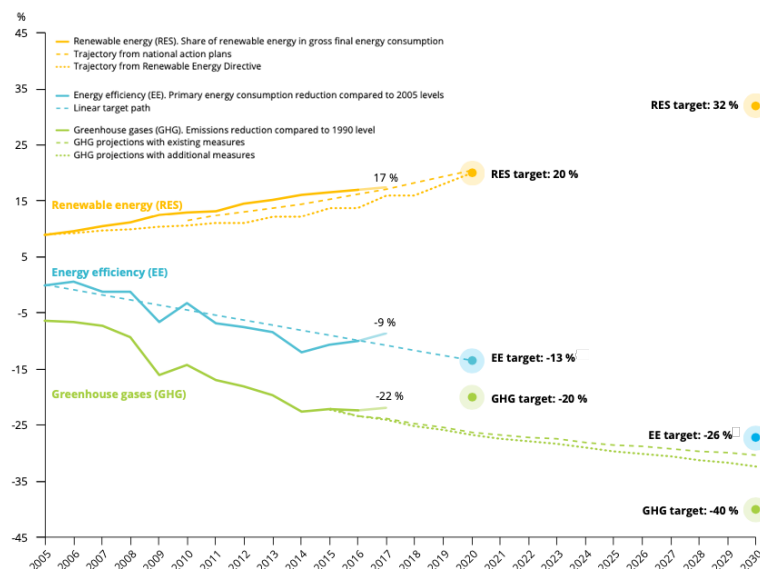


Figura 2.6. Evolució dels objectius fixats per la UE per finals del 2020 i 2030. Figura extreta de EEA (2018).

Els sistemes energètics poden ser vulnerables al canvi climàtic: hi poden haver afectacions directes a la demanda i al subministrament d'energia (i, per tant, a la seguretat de subministrament del sistema elèctric), així com al transport i les seves infraestructures (torres d'alta tensió). A més, hi poden haver afectacions indirectes a través d'altres sectors econòmics i socials.

En el camp de les energies renovables, els recursos naturals poden veure's molt afectats si el canvi climàtic fa variar el clima de les regions: augment o disminució de la precipitació, radiació solar que arriba a la superfície, recurs eòlic, etc.

Per tant, què passarà si el recurs eòlic, una de les fonts més importants d'energia neta, canvia la seva tendència degut al canvi climàtic? Actualment ja hi ha articles que alerten d'aquest possible escenari, alguns exemples en són McInnes et al. (2011); Pereira et al. (2013); Penmetsa and Holbert (2019); Solaun and Cerdà (2019).

En un futur proper, hi poden haver desplaçaments en la distribució del vent en regions concretes i, per tant, podria implicar el trasllat de parcs eòlics que quedarien obsolets i s'haurien de tornar a fer estudis de recurs eòlic a les noves zones escollides. La incertesa de la variació de la velocitat del vent és rellevant en els estudis.

Tots els objectius marcats, especialment per la UE, tindran una incertesa associada molt major a l'actual si en un futur pròxim (menys de 100 anys) s'han de realitzar mobilitzacions de parcs eòlics o plantes solars fotovoltaïques.

2.4 Recurs eòlic

El recurs eòlic és el valor de la velocitat del vent a 10 m d'altura a través del qual es pot extrapolar a alçades superiors per conèixer la potència esperada a altura de boixa d'un aerogenerador (Fabrega, 2020). Aquest es veu directament influenciat per l'orografia de l'àrea, del tipus de terreny de la zona (prat, muntanya, etc) o bé d'obstacles propers al punt de mesura.

El càlcul del potencial eòlic disponible per unitat d'àrea es calcula a partir de l'Equació 2.1:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho A v^3 = \frac{1}{2} \rho \pi D^2 v^3 \quad [kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} = W] \quad (2.1)$$

On A és l'àrea escombrada pel rotor d'un aerogenerador (m^2), D és el diàmetre del rotor (m), ρ és la densitat de l'aire a l'altura de caixa ($kg \cdot m^{-3}$) i v és la velocitat del vent a l'altura de caixa ($m \cdot s^{-1}$).

Segons el límit de Betz, el potencial eòlic disponible és el potencial màxim que es podria extreure de la força del vent, però no és el que realment s'aprofita. Si es pogués utilitzar tota l'energia cinètica del vent, a sotavent de l'aerogenerador no hi hauria flux de vent. Existeix un paràmetre anomenat coeficient de potència (C_p) que relaciona la potència disponible amb la potència aprofitada (Equació 2.2) tal que:

$$C_p = \frac{P_a}{P_d} \quad (2.2)$$

On P_a és la potència aprofitada pel rotor de l'aerogenerador.

La contribució de l'energia eòlica on-shore és la que més ha augmentat al mix energètic des de principis de segle, degut a que el grau de desenvolupament de la tecnologia és avançat comparat, per exemple, amb la tecnologia off-shore. Concretament a Espanya, l'eòlica on-shore és l'energia renovable principal amb més potència instal·lada. Mundialment, l'energia hidràulica la supera en potència instal·lada i, aproximadament contribueix en un 16% en el mix energètic mundial (BP, 2018).

La innovació al llarg dels anys ha permès aquest creixement: nous materials més resistents per a les pales, millora de l'electrònica de potència, augment de la mida de les pales i de l'altura de caixa, etc. Per això, els preus per kWh han disminuït i els beneficis associats són majors: la inversió inicial elevada és recuperable i és competitiva fins i tot, amb la generació convencional d'energia (combustió de recursos fòssils).

3 Objectius

L'objectiu d'aquest treball és establir una relació directa entre el canvi climàtic i la variabilitat que pot generar aquest sobre el recurs eòlic, a més d'estudiar i indicar quina és l'habilitat dels models climàtics globals per a detectar canvis en la distribució de vent.

Es pretén estudiar de manera detallada la potència eòlica disponible en diferents zones del planeta i observar la variabilitat dels propers 80 anys a partir dels escenaris plantejats per l'últim informe de l'IPCC. D'aquesta manera es buscaran i es compararan àrees que evolucionin de diferents maneres en 80 anys, amb l'objectiu concret de donar resposta a les següents qüestions:

- Hi haurà zones on el recurs eòlic disminuirà fins al punt que els parcs eòlics construïts ja no produeixen electricitat?
- Hi haurà zones amb baix recurs eòlic que augmentarà fins al punt de que sigui viable construir un parc eòlic?
- Hi haurà zones amb alt recurs eòlic que pràcticament no varii amb el pas del temps?
- Hi haurà zones de baix recurs eòlic que pràcticament no varii amb el pas del temps?

4 Metodologia

4.1 Simulacions dels models climàtics seleccionats

Per dur a terme la part pràctica d'aquest estudi es descarreguen en fitxers tipus NetCDF, les projeccions del mòdul del vent a 10 m simulades amb diferents models climàtics sota els quatre escenaris RCP previstos segons l'últim informe publicat per l'IPCC. NetCDF és un format digital d'arxius el qual s'utilitza per a emmagatzemar dades amb múltiples dimensions (temps, latitud, longitud, altura, per exemple). És un format molt emprat en l'àmbit de la climatologia i la meteorologia. Tot i ser conegut en aquesta àrea, el seu tractament de dades no és fàcil degut a les dimensions del fitxer i, per tant, resulta costós de treballar-hi si no es tenen coneixements de programació (R, Python) o si no es disposa d'un software complementari (Panoply, Toolbox). En definitiva, no es pot utilitzar un full de càlcul senzill com l'Excel.

Aquestes bases de dades s'extreuen de "Climate Data Store" (ECMWF, n.d.) i, constitueixen un conjunt de bases de dades que s'anomenen *CMIP5 monthly data on single levels* on es poden seleccionar diverses variables atmosfèriques com la temperatura, pressió, evaporació, radiació solar, etc. La variable interessant per aquest projecte és la velocitat del vent (en mòdul) calculada a 10 m de la superfície terrestre. Les bases de dades contenen mitjanes mensuals i tenen tres dimensions: latitud, longitud i temps. La resolució temporal és mensual (1 dada per mes) mentre que les altres dues dimensions depenen de la resolució espacial del model que pot variar segons el centre d'investigació que l'ha codificat (veure Taula 4.1).

Taula 4.1. Característiques de les bases de dades amb mitjanes mensuals utilitzades extretes de (ECMWF, n.d.). ϕ correspon a la latitud (en graus) de l'emplaçament.

Experiment	Model	Resolució latitudinal (°)	Resolució latitudinal (km)	Resolució longitudinal (°)	Resolució longitudinal (km)
RCP 2.6	cnrm_cm5	1.4007	155.6	1.406	$156.2 \cdot \cos(\phi)$
	mpi_esm_mr	1.8653	207.3	1.875	$208.4 \cdot \cos(\phi)$
RCP 4.5	giss_e2_h_cc	2	222.2	2.5	$277.8 \cdot \cos(\phi)$
	access1_0	1.25	138.9	1.875	$208.4 \cdot \cos(\phi)$
RCP 6	giss_e2_h	2	222.2	2.5	$277.8 \cdot \cos(\phi)$
RCP 8.5	cnrm_cm5	1.4007	155.6	1.406	$156.2 \cdot \cos(\phi)$
	access1_3	1.25	138.9	1.875	$208.3 \cdot \cos(\phi)$

A part de les característiques mostrades a la Taula 4.1, tots els models compleixen les mateixes condicions inicials i de contorn del grup `r1i1p1`; això vol dir que tots parteixen del mateix punt inicial i que les condicions de contorn varien de la mateixa manera. En l'anàlisi també es prenen els mateixos períodes temporals 01/2021-12/2100.

Com es pot observar, la resolució espacial en kilòmetres no és en cap cas menor de 100 km (per models globals de màxima resolució espacial, aquesta pot arribar a 60 km). La conversió d'angles a unitats mètriques es realitza a través d'aproximar 1° latitudinal $\simeq 111$ km. En canvi, la conversió de graus longitudinals a unitats mètriques és més complexa i la resolució longitudinal expressada en kilòmetres resulta dependent del cosinus de l'angle ϕ que correspon a la latitud (en graus) del punt espacial concret que s'analitza.

Inicialment es decideix treballar amb dos models per escenari RCP, tal i com es mostra a la Taula 4.1, per tal de comparar els resultats d'ambdós i identificar discrepàncies a nivell global (si n'hi ha). Però, les projeccions RCP 6 per tots els models disponibles excepte per un resulten incompletes degut a la falta de valors entre les longituds -180° i 0° , per tant, només és possible prendre un únic model complet en l'escenari RCP 6 i tots els altres es descarten de l'estudi.

La comparació entre models que comparteixen el mateix escenari futur és possible per diversos mitjans: estudis de comparació d'errors entre models del CMIP5 (cerca de bibliografia dels models), resolució i comparació de resultats en punts concrets del planeta.

Per comparar les variacions temporals de vent, es fan servir com a valors de referència les simulacions històriques amb cadascun dels models des de 01/1970 - 12/2005, aquest període de temps de més de

30 anys resulta significatiu i, per tant, suficient per emprar-lo com a referència.

Les simulacions històriques no són observacions, sinó que s'obtenen amb el mateix model empleat per l'escenari RCP corresponent però sota un sistema climàtic amb una hipòtesi diferent. Es tracten doncs, de simulacions forçades amb les variacions temporals dels agents forçadors obtingudes a partir d'observacions entre 1970 i 2005, com per exemple, concentracions de GEH, la radiació solar al cim de l'atmosfera, canvis en els usos del sòl, etc. Es determina una mitjana dels valors per cada mes en els diferents anys, obtenint un fitxer final amb dotze valors de velocitats de vent a 10 m de la superfície (un per cada mes de l'any).

D'aquesta manera, és possible comparar les variacions dels diferents escenaris futurs amb períodes anteriors a l'actual. A través del software Panoply, que permet fer representacions georeferenciades de les velocitats del vent a 10 m en un instant determinat i de les diferències entre dos instants de temps determinats, es representen les diferències entre la mitjana dels períodes 1970-2005 i un dels escenaris futurs en un mes determinat per cada punt (píxel) del model.

Es captura la diferència de quatre anys diferents del període 01/2021-12/2100: 2035, 2060, 2085 i 2100 en els quals es representen els mesos de febrer i juliol. Així doncs s'obtenen vuit representacions de la diferència de la velocitat de vent a 10 m de la superfície terrestre per cada escenari RCP (en total trenta-dues representacions). L'objectiu d'aquesta captura és observar a nivell global la variació de la velocitat del vent.

L'elecció d'aquests dos mesos es deu a que estadísticament, aquests mesos conjuntament amb gener i agost, corresponen en general als més càlids i més freds a latituds mitjanes (a l'hemisferi nord el febrer és el mes més fred i el juliol el més càlid, al contrari del que passa a l'hemisferi sud on el febrer és el mes més càlid i el juliol el més fred) d'aquesta manera es poden veure diferències més importants entre canvis en el vent.

4.2 Àrees de l'anàlisi

S'escullen nou punts concrets distribuïts sobre el planeta (Figura 4.1 i Taula 4.2) en els quals s'analitza el canvi en la distribució del vent durant el període 01/2021-12/2100, la velocitat del vent a una altura de 90 m (altura de boixa de la majoria d'aerogeneradors actuals) i el canvi al llarg dels anys i la potència disponible en aquell punt i la seva corresponent variació respecte el període de referència 01/1970-12/2005. Les característiques de cada emplaçament es presenten a la Taula 4.2.



Figura 4.1. Mapamundi amb les nou localitzacions seleccionades. Vuit localitzacions es troben dins de continent (hipotètica eòlica onshore), i una al mar de Noruega (hipotètica eòlica offshore).

Taula 4.2. Informació de les localitzacions escollides per l'estudi (OpenStreetMap contributors, n.d.).

	Brasil	Congo	Costa Noruega	Mali	Kazakhstan	Alemanya	Austràlia	Estats Units	Xina
Latitud (°)	-7.6	-1.8	61.0	20.0	54.0	52.8	-32.2	40.3	42.3
Longitud (°)	-70	27	3	-2	67	10	123	-91	110
Altitud (m)	185	711	0	284	148	70	248	176	1152
T _{mitjana} anual (°C)	25.8	25.4	6.8	28.2	1.9	8.5	18.7	10.0	6.4

4.3 Càlcul del recurs eòlic

Per cadascuna de les nou localitzacions, es pren el punt del model més proper a aquestes i mitjançant el software Panoply, s'extreu la sèrie temporal del període 01/2021-12/2100 on s'obtenen 960 valors de velocitats de vent a 10 m mensuals pels 80 anys complets. Es fa la mitjana anual de les velocitats de vent a 10 m amb tots els valors mensuals per un any complet.

La comparació es fa a través de períodes temporals d'uns 20 anys per tal de no seleccionar anys particulars que corresponen a anys singulars dins de la variabilitat natural (i.e. que s'allunya de la tendència o apareix un canvi molt brusc que a l'any següent desapareix). Per tant, es calcula la mitjana de les mitjanes anuals dels períodes 2021-2040 (ambdós extrems inclosos), 2041-2060, 2061-2080 i 2081-2100.

Finalment, s'obtenen cinc mitjanes de períodes diferents (incloent el període històric 1970-2005) per cada possible escenari futur (en total vint valors) de la velocitat del vent a 10 m de la superfície terrestre expressada en unitats de $m \cdot s^{-1}$. Interessa però, calcular els mateixos valors a 90 m de la superfície (altura més similar a l'altura on s'aprofita la velocitat del vent per produir energia) ja que actualment l'altura de boixa d'un aerogenerador se situa al voltant d'aquest valor.

A partir de les mitjanes a 10 m d'altura i a través de la relació empírica considerant com a bona aproximació que la variància anual d'aquests períodes és mitjana (Fabrega, 2020), es calcula la constant k adimensional de la distribució de Weibull (Equació 4.1). Aquesta distribució s'associa a la probabilitat de que el vent "bufi" a una determinada velocitat al llarg de l'any en un emplaçament concret. És una manera d'expressar el comportament del vent com una funció matemàtica.

$$k = 0.94 \sqrt{\langle v_{10} \rangle} \quad (4.1)$$

Una vegada s'ha trobat la constant k , es calcula la constant c mitjançant l'Equació 4.2:

$$c = \frac{\langle v_{10} \rangle}{\Gamma(1 + \frac{1}{k})} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (4.2)$$

On Γ és una funció tal que $\Gamma(n) = \int_0^\infty x^{n-1} e^{-x} dx$, on n és la variable de la funció que, en aquest cas és $n = 1 + \frac{1}{k}$.

A través d'equacions de transferència de les constants k i c a l'altura desitjada (Equacions 4.3, 4.4 i 4.5) i el posterior càlcul de la velocitat a aquella altura (Equació 4.6), es pot calcular el potencial eòlic disponible a través de l'Equació 2.1.

$$\beta = \frac{0.37 - 0.088 \ln(c)}{1 - 0.088 \ln(\frac{z}{10})} \quad (4.3)$$

$$c' = c \left(\frac{z'}{z} \right)^\beta \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (4.4)$$

On c' és la nova c a la nova altura z' .

$$k' = k \left(\frac{1 - 0.088 \ln(\frac{z}{10})}{1 - 0.088 \ln(\frac{z'}{10})} \right) \quad (4.5)$$

On k' és la nova k a la nova altura z' .

Càlcul de la velocitat de vent a 90 m de la superfície terrestre:

$$\langle v_{90} \rangle = c' \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{k'} \right) [m \cdot s^{-1}] \quad (4.6)$$

A partir dels valors de la distribució de Weibull a 90 m (k_{90} i c_{90}), es representa la densitat de probabilitat de la velocitat del vent per cada emplaçament. Es crea una taula amb valors enters de velocitat des de $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ fins a $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i es calcula la densitat de probabilitat seguint la distribució de Weibull per cada velocitat per un període temporal. Es fa el mateix amb tots els altres quatre i s'unifiquen en la mateixa representació gràfica per observar de manera visual la variació del vent durant els períodes. S'obtenen un total de trenta-sis representacions de la distribució (quatre per cada emplaçament degut a que es representa una per cada escenari RCP).

Degut a que l'equació del potencial eòlic disponible (Equació 4.1) depèn linealment de la densitat (ρ), aquesta densitat ha de calcular-se per cada punt d'estudi del planeta (la densitat de l'aire varia amb la temperatura i amb l'altitud sobre el nivell del mar (h)). Es prenen les dades de la Taula 4.2 i amb l'expressió següent (Equació 4.7) es troba la densitat a cada emplaçament (Fabrega, 2020).

$$\rho = 1.225 \cdot \left(\frac{288}{T_{mitjana\text{ anual}} + 273.15} \right) e^{-\left(\frac{h}{8435}\right)} [kg \cdot m^{-3}] \quad (4.7)$$

Una vegada s'ha calculat la potència eòlica disponible per unitat d'àrea (Equació 2.1 dividida entre A) per cada localització i cada període temporal, es calcula la variació de la velocitat del vent a 90 m (Equació 4.8) sempre entre el valor del període històric (subíndex *Històric*) i els quatre períodes de vint anys entre 2021 i 2100 (subíndex *Període*) per cada escenari i de la mateixa manera, es calcula la variació del potencial eòlic disponible (Equació 4.9).

$$Variació \langle v_{90} \rangle = \left(\frac{\langle v_{90} \rangle_{Període}}{\langle v_{90} \rangle_{Històric}} - 1 \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.8)$$

$$Variació \langle P_d \rangle / A = \left(\frac{\langle P_d \rangle / A_{Període}}{\langle P_d \rangle / A_{Històric}} - 1 \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.9)$$

Tal i com s'ha comentat, els subíndexs *Període* i *Històric* que acompanyen als valors mitjans de $\langle v_{90} \rangle$ i $\langle P_d \rangle / A$ representen el valor del període que s'avalua (per exemple: 2021-2040) i el valor corresponent al període històric respectivament.

5 Resultats i discussió

En aquesta secció es presenten i discuteixen els resultats obtinguts a través de la metodologia detallada en la secció anterior, alhora que s'analitza la variació del recurs eòlic al llarg del segle XXI en funció de les projeccions climàtiques futures de l'últim informe de l'IPCC.

5.1 Comparació i anàlisi dels models

Es comparen projeccions realitzades pels diferents models sota el mateix escenari futur en els mateixos instants de temps durant el període 01/2021-12/2100. En certes localitzacions on la velocitat del vent a 10 m no és gaire elevada ($1\text{--}2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) es troben resultats similars per ambdós models (com per exemple, el Congo o l'oest del Brasil) i en d'altres indrets els resultats entre models són completament discrepants, com al sud-oest d'Austràlia.

L'anàlisi qualitatiu de les projeccions demostra que no existeix concordança entre els models escollits degut a les diferències entre característiques (resolucions, parametritzacions, interaccions entre components, etc). Per tal de facilitar l'anàlisi del projecte es fa ús de la bibliografia per determinar el criteri de selecció d'un únic model representatiu per cada escenari. Seguint el raonament de Kamworapan and Surussavadee (2019) el qual compara els errors de quaranta dels models globals dissenyats per participar en l'activitat del CMIP5 (Figura 5.1), es decideix seleccionar els models que menys errors totals presenten.

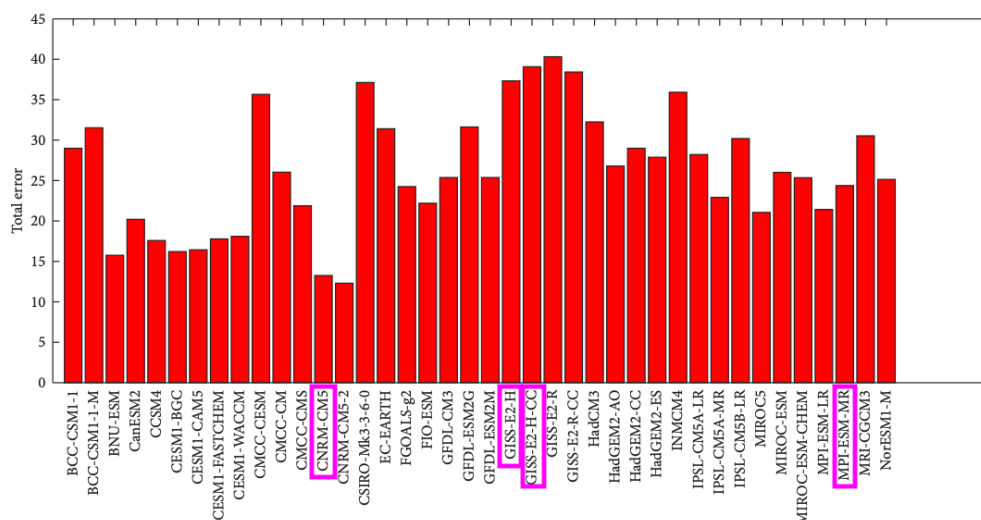


Figura 5.1. Errors totals de 40 models globals calculats utilitzant totes les mètriques de rendiment. S'identifiquen els models utilitzats en aquest projecte amb un requadre de color rosat. Figura extreta de Kamworapan and Surussavadee (2019).

Per l'escenari RCP 2.6, s'escull el model `cnrm_cm5` per davant de `mpi_esm_mr` ja que és el que menys errors presenta. Els models `giss_e2_h_cc` i `giss_e2_h` pertanyen respectivament als escenaris RCP 4.5 i 6 però s'observa un error total molt gran comparat amb tots els altres de la Figura 5.1.

Com no es poden comparar els errors dels models restants, es modifica el criteri d'elecció el qual passa a escollir el model amb major resolució espacial (veure Taula 4.1) que alhora coincideix amb la selecció del model per l'escenari RCP 2.6.

Les discrepàncies entre els resultats dels models per un mateix escenari es deuen a que la variable del vent és una de les més difícils de simular ja que depèn de molts factors com ara la irradiància solar, el tipus de superfície de la localització, la temperatura de l'aire, l'orografia, la vegetació, entre d'altres. Cada model resol les equacions d'una manera i fa servir unes parametritzacions que poden ser més o menys exactes i, per tant, és comprensible que dos models que no tenen el mateix origen (mateixa autoria de centre d'investigació) discrepin en alguns dels seus resultats.

La incertesa de cada model és molt important en aquest cas i sempre resulta diferent entre institucions; per aquest motiu, es realitzen les intercomparacions dels models. A la Figura 2.5 es visualitza una línia (la tendència general) dintre d'una part ombrejada (la combinació d'incerteses de tots els models) per cada un dels dos escenaris extrems.

Finalment, els models escollits segons el raonament anterior s'indiquen a la taula següent (Taula 5.1).

Taula 5.1. Elecció models d'estudi corresponents a cada escenari RCP.

Experiment	Model
RCP 2.6	cnrm_cm5
RCP 4.5	access1.0
RCP 6	giss_e2_h
RCP 8.5	access1.3

Les localitzacions escollides per a l'estudi consisteixen en un punt concret del planeta, però degut a la resolució espacial de cada model, les coordenades per cada localització no coincideixen si no es disposa del mateix model (Taula 5.2). S'observa doncs que pels escenaris RCP 4.5 i 8.5 on s'ha utilitzat el model del mateix centre d'investigació `access1_x` ($x = 0$ i 3) les localitzacions sí que són les mateixes.

Taula 5.2. Coordenades de sortida dels models per cada escenari RCP del model escollit per cada una de les localitzacions.

		Brasil	Congo	Costa Noruega	Mali	Kazakhstan	Alemanya	Austràlia	Estats Units	Xina
RCP 2.6	Latitud (°)	-7.70422	-0.7004	60.9331	20.3111	53.9294	52.5286	-32.9180	39.9218	42.7233
	Longitud (°)	-70.313	26.719	2.813	-1.406	67.500	9.844	123.750	-91.406	109.688
RCP 4.5	Latitud (°)	-8.125	-1.875	61.875	20.625	54.375	53.125	-31.875	40.625	41.875
	Longitud (°)	-70.313	27.188	2.813	-2.813	66.563	10.313	122.813	-90.938	109.688
RCP 6	Latitud (°)	-7	-1	61	21	55	53	-33	41	43
	Longitud (°)	-68.75	26.25	3.75	-1.25	66.25	8.75	123.75	-91.25	111.25
RCP 8.5	Latitud (°)	-8.125	-1.875	61.875	20.625	54.375	53.125	-31.875	40.625	43.125
	Longitud (°)	-70.313	27.188	2.813	-2.813	66.563	10.313	122.813	-90.938	109.688

5.2 Canvis del recurs eòlic

El canvi en el recurs eòlic s'estudia de manera global i regional. A nivell global es troben vuit representacions gràfiques per cadascun dels quatre escenaris RCP. A la Figura 5.2 s'exposen quatre representacions com a exemples globals per cada escenari (veure les altres a Annexos).

Totes les zones del planeta que es troben marcades amb colors diferents al blanc, indiquen una diferència en la velocitat del vent a 10 m de la superfície d'un any concret en comparació amb la mitjana dels resultats de la simulació històrica d'aquell mateix mes. Les diferències no nul·les tenen dos resultats, els valors positius (colors càlids, i.e. vermells) que demostren un increment de la velocitat del vent i els valors negatius (colors freds, i.e. blaus) que demostren una disminució amb el pas del temps.

La Figura 5.2 mostra que els dos casos representats presenten majoritàriament una variabilitat regional, de la mateixa manera que les altres representacions dels Annexos. Pel contrari, s'observaria un mapamundi pràcticament incolor.

Les diferències més importants entre velocitats del vent a 10 m s'identifiquen majoritàriament als oceans i també en algunes zones costaneres, on és possible construir eòlica off-shore, i no pas al continent (eòlica onshore) on es troba instal·lada la major part de la potència eòlica actual. També es poden observar els efectes de l'estacionalitat: a l'estiu (febrer per l'hemisferi sud i juliol per l'hemisferi nord) les diferències entre velocitat de vent resulten més elevades.

Totes les representacions van acompanyades de tres valors a sota de la llegenda indicats amb les etiquetes de Data Min, Max i Mean, els valors d'aquestes etiquetes signifiquen un resum de tota la base de dades: el mínim valor de la diferència, el màxim valor de totes les diferències i la mitjana respectivament. La mitjana global de les diferències resulta nul·la o molt propera al zero durant tots els anys (2035, 2060, 2085 i 2100) en tots els escenaris RCP. El màxim valor trobat és igual a $-0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura Ig a Annexos), això vol dir que la distribució espacial de la velocitat del vent varia, però dins el sistema planeta Terra, es manté constant en el temps.

Cal destacar que aquest comportament és completament diferent a la mitjana de la variació de la temperatura global que va augmentant amb els anys degut, principalment, a l'augment de les emissions de GEH.

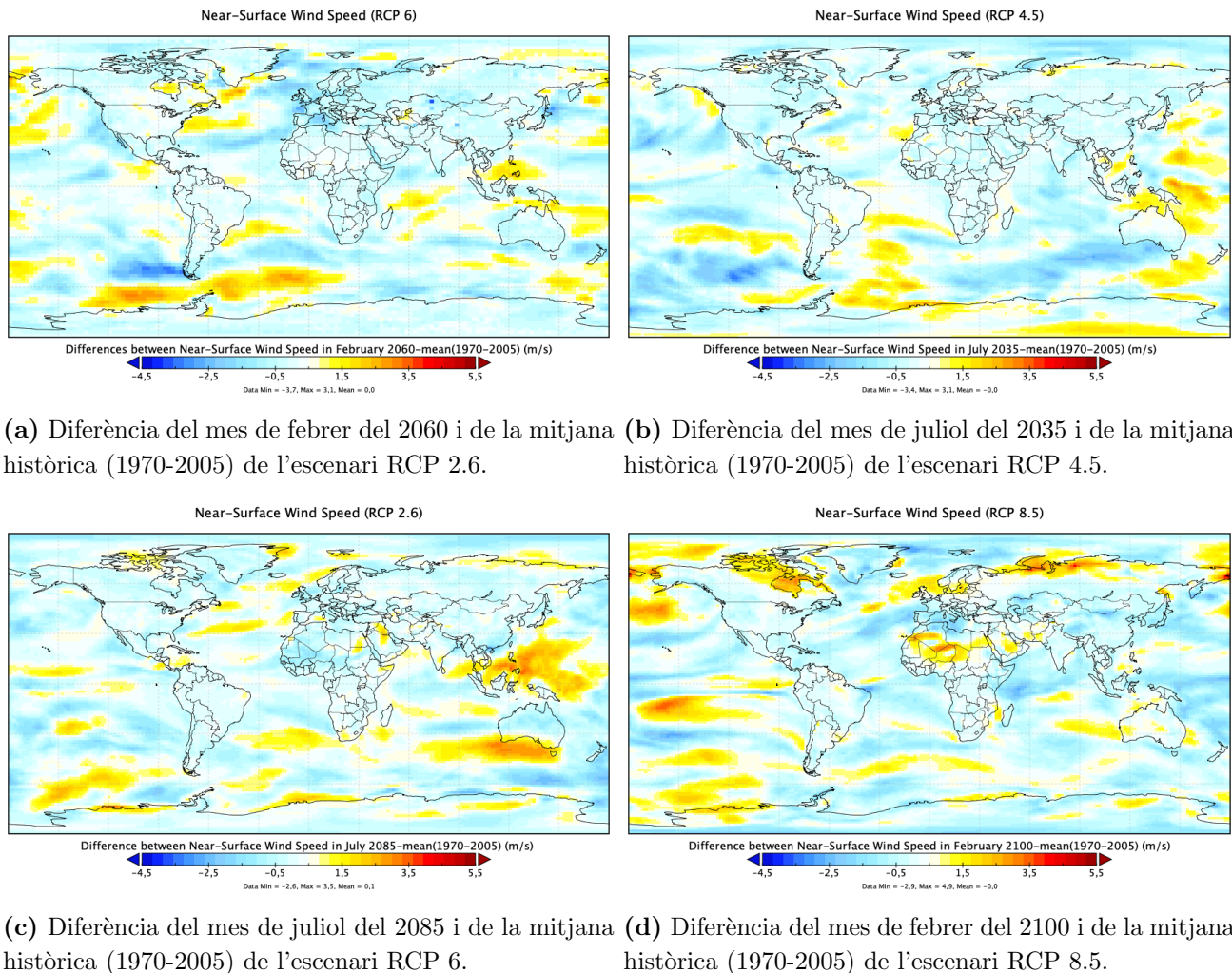


Figura 5.2. Representacions gràfiques globals de les diferències de les sortides de les projeccions climàtiques i les simulacions històriques de velocitats de vent a 10 m en un instant determinat.

Mitjançant l'Equació 4.7 es calcula la densitat per cada punt espacial escollit. Aquesta depèn tant de l'altura com del clima de la regió per conèixer la temperatura anual mitjana. Per aquest motiu, resulta de gran importància realitzar aquest càlcul, ja que, com s'observa a la Taula 5.3, la majoria de valors de la densitat obtinguts són diferents en més de $0.01 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. L'aproximació a densitats iguals per tots els emplaçaments ($1.225 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) hagués implicat un càlcul erroni del potencial eòlic disponible.

Taula 5.3. Resultat del càlcul de la densitat per cada punt geogràfic objecte d'estudi.

	ρ (kg · m ⁻³)
Brasil	1.14
Congo	1.07
Costa Noruega	1.25
Mali	1.12
Kazakhstan	1.25
Alemanya	1.23
Austràlia	1.16
Estats Units	1.21
Xina	1.09

Es determinen les distribucions de probabilitat de cada regió escollida, calculades a partir de la funció de distribució de Weibull per cada període temporal, per comparar el seu desplaçament durant el temps i el seu canvi de variància.

El màxim de les distribucions de probabilitat de tipus Weibull indica la moda de la distribució (la velocitat de vent anual que més probable és que es doni a l'emplaçament), mentre que la mitjana està desplaçada cap a la dreta. Els extrems de la corba de distribució mostren velocitats de vent que es donen en molt poques situacions (poca freqüència).

A diferència de les distribucions de probabilitat de temperatura que segueixen un patró de distribució Gaussiana (funció simètrica) i, permeten quantificar el canvi de la variància i identificar l'augment o disminució de fenòmens extrems i molt extrems (onades de calor i de fred excepcionals), la distribució de Weibull al no ser simètrica, només permet valorar el canvi de la variància en termes qualitatius. En aquest cas, la identificació del canvi en la variància permet conèixer l'increment o la disminució de fenòmens extrems: ràfegues de vent que poden comprometre la disponibilitat de l'aerogenerador. L'anàlisi de les distribucions de Weibull no és trivial i realitzar una estimació qualitativa queda fora de l'objectiu d'aquest treball.

Les quatre distribucions més representatives per cada cas d'entre tots els escenaris futurs i localitzacions, es mostren a continuació (Figura 5.3). Totes les altres representacions es poden veure als Annexos. Estudiem cada un dels casos concrets.

A la Figura 5.3a referent al Brasil, s'observa com totes les corbes dels diferents períodes temporals es superposen fins al nivell que es fa difícil de distingir si només n'hi ha una o hi són totes. Per tant, la distribució del vent en aquest emplaçament en l'escenari RCP 2.6 no varia al llarg del segle.

D'altra manera, a la Figura 5.3c es distingeixen quatre períodes temporals: l'històric, 2041-2060, 2061-2080 i 2081-2100. Això implica que hi ha hagut un canvi entre períodes. El període que no es visualitza (2021-2040) es troba solapat amb el període 2061-2080. Així doncs, la mitjana de la distribució de Weibull de la velocitat del vent a 90 m a finals de segle es troba desplaçada cap a l'esquerra, i, per tant, a l'emplaçament hi ha hagut una disminució de la velocitat mitjana. A la vegada, la velocitat amb més probabilitat (la moda de la distribució) també s'ha vist afectada i ha disminuït.

En canvi, a les Figures 5.3b i 5.3d es veu com el desplaçament de totes les corbes respecte el període històric és positiu (cap a la dreta) ja que els valors de velocitat mitjana i de més probabilitat augmenten. De totes maneres, aquest desplaçament no és lineal ja que en la Figura 5.3b, el període 2021-2040 està més desplaçat cap a la dreta respecte el període històric que el període a finals de segle. Els períodes 2041-2060 i 2061-2080 se situen sota la corba del període 2081-2100. Aquesta no linealitat podria estar relacionada amb la pròpia variabilitat interna degut a les variacions de patrons a gran escala.

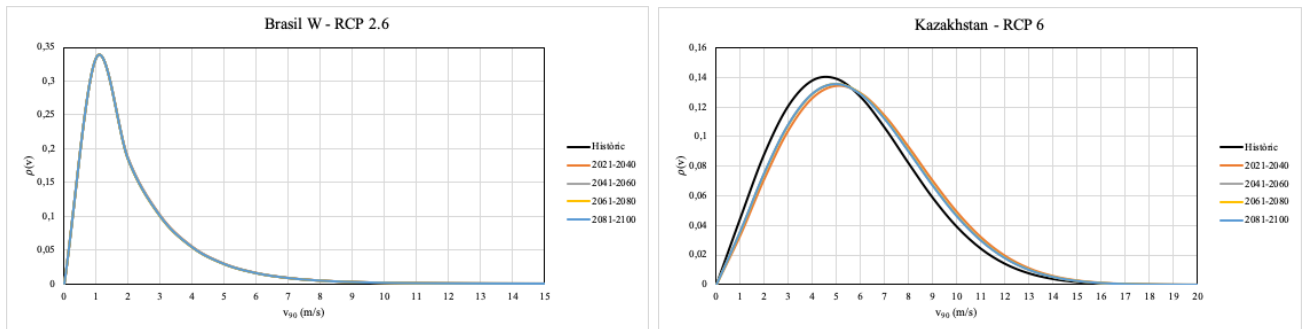
A la Figura 5.3d s'observen les cinc corbes de la distribució i de nou, el desplaçament a finals de segle és menor respecte l'històric que el període 2021-2040, tot i que en aquest cas, es veu una transició lineal des de 2021 a 2100.

És possible estudiar la variància de les representacions de la Figura 5.3 d'una manera qualitativa a través d'observacions de les funcions. A la Figura 5.3a, les corbes, tal i com s'ha comentat, es troben solapades i, per tant, tampoc apareixen canvis en la variància. A la Figura 5.3c, els màxims entre els períodes que es poden distingir no coincideixen, el valor del màxim del període 2081-2100 és el més alt i, per tant, la variància a l'últim període del segle és la més baixa. A les Figures 5.3b i 5.3d, la variància a finals de segle és major comparada amb el període històric ja que el màxim de la corba de la distribució ha disminuït. Tot i que, de la mateixa manera que la velocitat, la variància resulta més alta al període inicial (2021-2040) i, al període 2081-2100 disminueix.

A més, cadascuna de les quatre figures comentades presenta una forma diferent. La funció de la Figura 5.3a és la més estreta, i d'aquesta manera, el rang de velocitats de la localització del Brasil és molt petit: només conté fins a nou unitats de velocitat del vent. La funció de Figura 5.3b, és molt més ampla i el seu rang de velocitats és set unitats major que el del Brasil. La funció de Figura 5.3c té una forma més simètrica que les altres i pot recordar a una distribució Gaussina, ja que existeixen dos extrems ben definits.

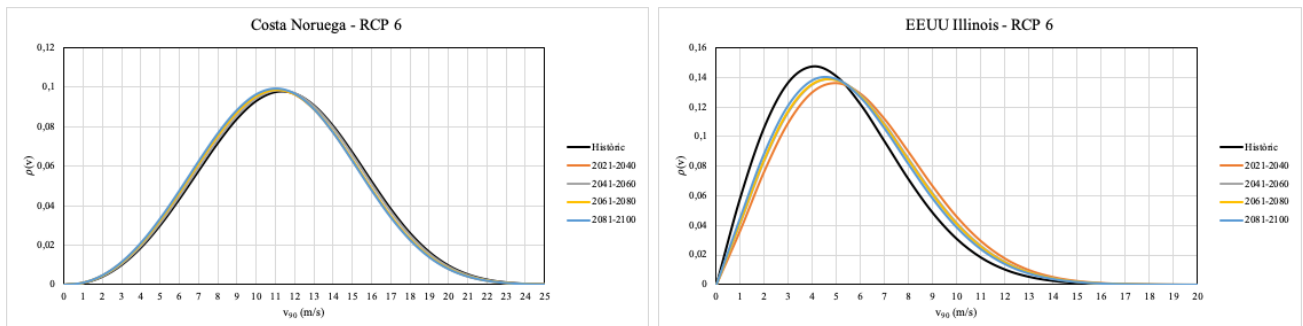
Totes aquestes diferències són degudes a les característiques del vent a cada emplaçament, aquestes característiques es representen amb els paràmetres k i c de la distribució de Weibull que varien molt entre emplaçaments i una mica menys (menys d'una unitat) entre períodes temporals d'un mateix emplaçament (veure Taules I, II, III i IV als Annexos). Per aquest motiu, no es troba cap cas en el qual en una mateixa representació hi hagi dos corbes notòriament desiguals.

Generalment, l'aprovació de la construcció d'un parc eòlic solament es dona per les localitzacions on la distribució de Weibull tingui una k igual a 2, ja que són els llocs on es pot aprofitar de manera més òptima la potència disponible del vent i és viable en termes econòmics. De fet, els fabricants d'aerogeneradors proporcionen corbes de potència de les màquines per emplaçaments on el vent compleixi una distribució de Weibull amb una $k=2$.



(a) Distribució de Weibull a Brasil per l'escenari RCP 2.6.

(b) Distribució de Weibull a Kazakhstan per l'escenari RCP 6.



(c) Distribució de Weibull a la costa de Noruega per l'escenari RCP 6.

(d) Distribució de Weibull a Estats Units per l'escenari RCP 6.

Figura 5.3. Distribució de probabilitat de Weibull per quatre localitzacions i escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.

A la Taula 5.4 es presenten, en format numèric, les velocitats mitjanes a 90 m per cada emplaçament en cada escenari per cada període temporal. Si es comparen els valors de les velocitats entre diferents escenaris RCP per un mateix emplaçament, s'observen diferències d'increments i disminucions de la velocitat del vent segons el període. Per exemple, mentre que a Mali entre els períodes 2021-2040 i 2041-2060, per l'escenari RCP 2.6 hi ha un creixement de la velocitat de $0.13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, per l'escenari RCP 8.5 observem un decreixement de $0.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. En aquest sentit, es pot entendre que cada escenari RCP és independent i la tendència temporal de cadascun no té cap relació amb les altres.

També es podria esperar que tots els valors dels diferents escenaris de la velocitat del vent en el període històric en un mateix emplaçament fossin iguals i que el seu valor canviés a partir de les dades extretes a partir de les projeccions climàtiques, però tal i com es mostra a la Taula 5.4, els valors de les velocitats són diferents per cada escenari RCP. Això és degut a que, com bé s'ha comentat, no s'utilitzen les observacions històriques com a base de dades del període històric, sinó que s'usen els resultats de les simulacions històriques per cada model.

Taula 5.4. Velocitats mitjanes a 90 m d'altura per cada emplaçament escollit, per cada escenari RCP i cada període temporal.

	$\langle v_{90} \rangle (\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$											
	Brasil				Congo				Costa Noruega			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
Històric	1.64	2.40	3.17	1.71	1.59	2.10	2.43	1.55	10.80	12.28	11.41	12.57
2021-2040	1.66	2.34	3.19	1.70	1.58	2.09	2.36	1.56	10.63	12.34	11.16	12.65
2041-2060	1.65	2.34	3.21	1.70	1.60	2.08	2.34	1.56	10.57	12.13	11.32	12.79
2061-2080	1.63	2.40	3.23	1.71	1.58	2.11	2.34	1.57	10.57	12.35	11.18	12.77
2081-2100	1.64	2.37	3.22	1.67	1.58	2.10	2.33	1.58	10.62	12.43	11.12	12.48

	Mali				Kazakhstan				Alemanya			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
Històric	7.28	7.68	5.49	10.04	8.07	6.33	5.54	6.76	6.79	6.21	5.25	5.31
2021-2040	7.20	7.79	5.41	10.08	8.11	6.43	5.99	6.92	6.78	6.27	5.39	5.31
2041-2060	7.33	7.78	5.49	10.05	7.99	6.31	5.88	6.81	6.83	6.37	5.33	5.32
2061-2080	7.30	7.73	5.47	10.07	7.98	6.40	5.88	6.85	6.76	6.37	5.23	5.41
2081-2100	7.19	7.85	5.43	10.00	8.05	6.35	5.87	6.77	6.74	6.30	5.15	5.31

	Austràlia				Estats Units				Xina			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
Històric	6.40	6.33	6.96	6.99	7.22	6.30	5.14	5.18	7.46	5.68	5.83	10.32
2021-2040	6.42	6.37	6.93	7.07	7.25	6.43	5.84	5.20	7.51	5.69	5.84	10.38
2041-2060	6.50	6.37	6.87	7.08	7.32	6.45	5.66	5.16	7.51	5.64	5.80	10.30
2061-2080	6.45	6.37	6.83	7.15	7.34	6.36	5.62	5.11	7.49	5.63	5.82	10.05
2081-2100	6.46	6.33	6.87	7.24	7.36	6.38	5.52	5.11	7.48	5.61	5.80	10.02

Les variacions de les velocitats mitjanes a 90 m de la superfície terrestre es poden veure a la Taula V dels Annexos.

La potència disponible per unitat d'àrea es calcula per analitzar si la construcció d'un parc eòlic en l'emplaçament és viable econòmicament i energèticament. La Taula VI dels Annexos recull els resultats del càlcul de P_d/A per cada localització, període i projecció climàtica.

Segons Rodriguez et al. (2003), els aerogeneradors actuals tenen, de mitjana, una potència nominal per unitat d'àrea d'uns $360 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, tot i que existeixen aerogeneradors amb una potència nominal per àrea superior a aquest valor. Només cinc de les nou localitzacions escollides sobrepassen aquesta potència disponible per àrea llindar i no per tots els escenaris: Costa de Noruega supera els $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ en tots els casos, Mali per RCP 4.5 i 8.5, Kazakhstan per RCP 2.6, Estats Units per RCP 2.6 i Xina per RCP 2.6 i 8.5.

Complementàriament, per preveure la instal·lació d'un parc eòlic el que s'ha de tenir en compte és la variació temporal del recurs eòlic o la velocitat del vent a l'altura de boixa dels aerogeneradors (90 m) i la variació de la potència disponible per unitat d'àrea. La Taula 5.5 mostra la variació de potència disponible mitjana per unitat d'àrea entre cada un dels períodes de 20 anys amb el període històric. D'aquesta manera si es troben fluctuacions positives i negatives en un mateix escenari futur i una mateixa localització al llarg del segle es pot concloure que aquell emplaçament no resulta adequat si a

la vegada, disminueix la $\langle P_d \rangle / A$ per sota del valor llindar. Encara que els períodes de 20 anys no es comparen numèricament entre si, com tots tenen el mateix període de referència, l'històric, es poden comparar igualment.

Com que $\langle P_d \rangle / A$ depèn de la mitjana de la velocitat a l'altura de boixa al cub, una mínima variació de la velocitat del vent, per exemple $0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, implica l'aparició d'un factor 1.082 que pot arribar a provocar diferències significatives en la potència instal·lada del parc al llarg del segle. Per això, les variacions temporals que es mostren a la Taula 5.5 poden arribar a sorprendre ja que arriben fins a canvis del 36% (Estats Units, RCP 6, període temporal entre 2021-2040 i l'històric).

L'estudi de Carvalho et al. (2017) sobre el recurs eòlic a Europa, es pot comparar amb els dos emplaçaments del continent europeu seleccionats, Alemanya i la costa de Noruega. Hi poden haver discrepàncies entre l'estudi i aquesta última localització ja que no s'analitzen les localitzacions marines. A la Taula 5.5 s'observa com a la variació de potència disponible a finals de segle tant per Alemanya com per la costa de Noruega és negativa per tots els escenaris excepte RCP 4.5. Aquesta observació coincideix amb els resultats que conclouen l'article.

També s'analitzen les diferències entre les quatre projeccions climàtiques per cada emplaçament. Com que el forçament radiatiu per cada escenari varia d'una manera diferent en cada cas, s'espera que a l'estudi de variació temporal de $\langle P_d \rangle / A$ no s'hi trobi cap relació ni tendència. Es pretén mostrar que l'escenari amb menys forçament (RCP 2.6) radiatiu a finals de segle no presenta una variació més suau que l'escenari amb més forçament radiatiu (RCP 8.5). L'escenari que presenta més variació en aquest aspecte és RCP 6 on a les localitzacions de Kazakhstan i Estats Units la variació arriba a l'ordre del 10% quan en tots els altres escenaris i localitzacions la variació és de l'ordre de magnitud 1%.

Els canvis del recurs eòlic al llarg del segle amb els diferents escenaris RCP no impliquen canvis rellevants que puguin afectar a la viabilitat d'un parc eòlic ja instal·lat. La producció d'energia sí que pot augmentar o disminuir al llarg dels anys, però en cap dels casos estudiats perillaria el parc eòlic com a tal.

Taula 5.5. Variació de la potència disponible per unitat d'àrea entre els períodes de 20 anys del segle XXI i el període històric (1970-2005).

	Variació temporal $\langle P_d \rangle / A(\%)$											
	Brasil				Congo				Costa Noruega			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
(2021-2040)-Històric	1.78	-4.56	1.76	-0.60	-1.33	-1.49	-5.30	0.96	-4.31	1.38	-5.72	1.78
(2041-2060)-Històric	1.24	-4.95	2.78	-0.23	-0.31	-1.81	-6.75	1.77	-5.67	-3.10	-2.14	4.99
(2061-2080)-Històric	-0.69	0.29	4.05	0.15	-1.41	0.06	-6.92	2.09	-5.77	1.58	-5.45	4.46
(2081-2100)-Històric	0.08	-2.67	3.72	-2.99	-1.17	-0.71	-7.36	3.07	-4.49	3.40	-6.71	-1.92

	Mali				Kazakhstan				Alemanya			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
(2021-2040)-Històric	-2.73	3.72	-3.58	1.01	1.48	3.81	20.88	6.01	-0.28	2.35	6.53	0.11
(2041-2060)-Històric	-1.64	3.34	-0.40	0.36	-2.44	-1.01	15.58	1.93	1.79	6.27	3.55	0.61
(2061-2080)-Històric	0.84	1.95	-0.86	0.73	-2.74	2.89	15.61	3.20	-1.01	6.22	-0.81	4.36
(2081-2100)-Històric	-3.00	5.77	-2.66	-0.99	-0.62	0.83	14.92	0.06	-1.84	3.57	-4.30	-0.08

	Austràlia				Estats Units				Xina			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
(2021-2040)-Històric	0.73	1.51	-1.10	2.81	1.03	5.43	36.50	1.12	1.56	0.49	0.43	1.57
(2041-2060)-Històric	3.84	1.53	-3.33	3.17	3.55	6.23	26.12	-0.65	1.77	-1.73	-1.23	-0.69
(2061-2080)-Històric	1.91	1.65	-4.72	5.81	4.00	2.62	24.29	-3.05	1.07	-1.83	-0.50	-7.01
(2081-2100)-Històric	2.16	-0.09	-3.37	9.28	4.97	3.26	19.02	-3.14	0.78	-2.80	-1.53	-7.69

Aquests resultats impliquen, doncs, que l'aprofitament del recurs eòlic és un bon aliat com a energia renovable en la lluita i mitigació contra el canvi climàtic.

Malgrat això, s'ha de tenir en compte que la variància en alguns escenaris augmenta i, per tant, la possibilitat d'ocurrència de fenòmens extrems que facin perillar la disponibilitat de la màquina s'incrementa. Tot i que els aerogeneradors poden arribar a suportar velocitats de fins a $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, unes velocitats de vent altes constants provoquen un augment en la velocitat de degradació de la màquina.

5.3 Limitacions de l'estudi

És convenient dedicar la secció final de l'estudi a analitzar les limitacions dels models, de l'anàlisi de dades, dels resultats extrets i, en general, les del treball realitzat.

Tal i com s'ha descrit a la metodologia, els models tenen resolucions diferents entre ells. Els seleccionats tenen, en realitat, una resolució baixa comparada amb el màxim de resolució que es pot arribar a obtenir en models globals (60 km). De fet, l'estudi a nivell regional, en els punts del planeta on es prenen valors de la velocitat del vent a 10 m de la superfície terrestre, ofereix un interval mínim de més de 130 km, 70 km superior al màxim de resolució. En aquest sentit, les dades dels punts escollits poden no ser coincidents amb altres models del mateix escenari degut a les diferències entre les equacions que expliquen els fenòmens físics, químics i biològics i les parametritzacions dels models.

S'ha vist que la utilització de models climàtics globals per realitzar un estudi del recurs eòlic a nivell local no és el més indicat. S'hauria de prendre un model climàtic regional, on algunes de les parametritzacions en el model global (aproximacions dels fenòmens no observables pel pas de malla del model) passen a ser equacions amb resultats exactes, i on la resolució espacial és de l'escala dels metres. Tot i això, existeixen similituds entre models globals i regionals ja que s'utilitzen les mateixes equacions pels fenòmens globals, ambdós treballen amb malles regulars que defineixen la resolució espacial i temporal i requereixen de condició d'estabilitat i utilitzen parametritzacions (encara que diferents) per comptabilitzar processos amb un pas de malla menor.

En realitat, no es pot conèixer el comportament regional a partir d'un model global, ja que la resolució és molt baixa i no es tenen en compte factors com l'orografia, la proximitat de l'emplaçament a la costa i altres processos que es donen a escales temporals i espacials menors i que, per tant, s'han de parametritzar. Aquestes parametritzacions (simplificacions molt senzilles de la realitat) poden ser diferents entre els models i simulacions, el que implica que els resultats no siguin sempre iguals entre models.

En aquest sentit, un model global no ens permet extreure dades sòlides de zones concretes del planeta. Un model climàtic regional pot presentar uns valors completament diferents al model global degut a la millora en la resolució espacial i temporal i la consideració de fenòmens locals, que no són possibles d'estudiar a gran escala perquè resulten insignificants davant dels grans processos globals.

Les dades de sortida dels models no ens mostren els episodis extrems ni la seva freqüència. A curt termini, les incerteses de la variabilitat natural, en menor mesura, i del model limitaran els resultats. A llarg termini, la incertesa del model i la incertesa de l'escenari de desenvolupament limitaran els resultats. És molt difícil preveure què passarà en 50 anys, hi poden haver successos inesperats que modifiquin completament el sistema (com a exemple, possibles canvis en les polítiques ambientals).

A part de tots aquests punts, la dificultat del treball recau en el nivell de confiança que se li pot atribuir a la sortida dels models corresponents al vent. Aquest és una de les variables més difícils de modelitzar, ja que no és una variable directa (com la temperatura), sinó que depèn dels canvis de pressió i temperatura. A més, com els resultats dels models es donen a 10 m de la superfície terrestre, es tenen en compte els efectes convectius i conductius. Les equacions que hi ha darrere són molt complexes.

L'estudi del recurs eòlic depèn del terreny de la zona on es té prevista la construcció d'un parc eòlic i també dels obstacles propers. Si hi ha un soc o un petit turó en la zona d'estudi o si hi ha una línia elèctrica, un arbre o una casa situats en les proximitats d'un futur emplaçament d'un aerogenerador, és necessari el canvi d'ubicació de l'emplaçament, ja que la distorsió del flux del vent pot reduir la potència disponible per la generació d'electricitat. Els models regionals, a no ser que tinguin molt bona resolució espacial (d'uns pocs metres), no contemplaran aquests possibles obstacles o variacions del terreny i, per tant, l'estudi de la viabilitat d'un parc eòlic mai es podrà tancar sense una visita a l'emplaçament.

A més, com la sortida dels models és sempre la mitjana mensual de la velocitat de vent a 10 m de la superfície terrestre, s'ha hagut de realitzar una aproximació (que està acceptada) degut a la desconexió de la variància, aquesta variància s'ha considerat *mitjana* en comptes de *petita* o *gran*. Si s'hagués considerat qualsevol d'aquestes dues, els resultats del càlcul de la constant k , c i β haguessin sigut lleugerament diferents i això, hauria afectat al càlcul de la potència disponible per unitat d'àrea.

Una altra limitació ha sigut el tipus de dades que s'han tractat, i és que l'ús de mitjanes mensuals i anuals no mostra l'estudi de les ràfegues màximes de vent a cada emplaçament. Aquesta variable hauria de ser un complement imprescindible per un estudi complet de l'afectació sobre la viabilitat d'un parc eòlic i la influència del canvi climàtic sobre la velocitat del vent.

D'altra banda, degut a la complexitat del tractament de les bases de dades, pel càlcul de la densitat a cada emplaçament, s'ha considerat que la $T_{mitjana\,anual}$ és constant en el temps i, per tant, s'ha de ser conscient que en certa mesura contradiu els patrons dels escenaris futurs on, en tots els casos, la temperatura global augmenta a finals de segle, que alhora implica que la temperatura a nivell regional pot variar tant de manera positiva com negativa. Es tracta d'una aproximació, ja que l'objecte d'estudi és la velocitat del vent i no la temperatura. Per exemple, si la $T_{mitjana\,anual}$ varia en un emplaçament $+2^{\circ}\text{C}$, la densitat de l'aire disminuiria en $0.01\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, mentre que si la variació fos de -2°C , la densitat de l'aire augmentaria. Degut a que la densitat és una variable directament proporcional a la potència disponible, la variació de la temperatura implicaria diferències en els percentatges de canvi entre períodes, tot i que la influència seria menor que la del canvi de velocitat.

6 Conclusions

L'estudi que s'ha dut a terme en el treball ha tingut com a objectiu estudiar la variació del recurs eòlic en nou emplaçaments diferentment distribuïts pel planeta a partir dels resultats de sortida dels models globals climàtics per cada escenari futur descrit a l'últim informe de l'IPCC.

Inicialment, s'ha estudiat la variació del recurs eòlic qualitativament respecte el període històric des de 1970 a 2005 per diferents anys des de 2021 a 2100. De manera global, s'ha vist que la variació del recurs eòlic és nul·la al llarg del segle XXI per qualsevol dels escenaris futurs. Això xoca amb la variació de la temperatura que sí que presenta una tendència positiva en tots els casos. Però, a nivell regional, la variació del recurs eòlic resulta evident. Aquesta variació és molt més pronunciada a zones oceàniques, però en algunes localitzacions dels continents apareixen diferències de fins a $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ aproximadament.

Un cop les localitzacions d'estudi han sigut establertes, es calcula una corba de distribució de Weibull i el seu desplaçament pels diferents períodes des de 2021 a 2100 dividits en períodes de 20 anys.

Els desplaçaments de les distribucions de Weibull per un mateix escenari RCP i un mateix emplaçament no sobrepassen en cap cas $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Una petita variació en la velocitat mitjana de l'emplaçament implica una gran variació sobre la potència disponible, ja que la relació entre els termes és cúbica. Així doncs, el més important és l'estudi posterior sobre el valor de la potència disponible mitjana per àrea i la seva variació entre períodes.

Segons els resultats numèrics de les variacions de les mitjanes de la velocitat del vent a 90 m i de la potència disponible es poden respondre les preguntes plantejades als objectius (si el recurs eòlic ha variat en el llarg del segle XXI impedit o permetent la construcció d'un parc eòlic, o bé si aquest ha restat invariant).

De les nou localitzacions i els quatre escenaris RCP futurs, s'ha trobat que hi ha zones on el recurs eòlic disminuirà (RCP 6 a la Costa de Noruega i Alemanya i RCP 8.5 a Xina) i conseqüentment, la potència disponible d'un aerogenerador disminuirà de manera cúbica, però en cap cas, s'arribarà a l'extrem de que a si hi hagués un parc eòlic instal·lat en l'emplaçament, aquest quedés obsolet. Alhora, també s'ha trobat que hi ha emplaçaments on el recurs eòlic augmentarà (RCP 6 a Kazakhstan i a Estats Units, RCP 8.5 Austràlia) tot i que no suficientment com per a que un parc eòlic resulti viable.

El més habitual als emplaçaments seleccionats, és que la variació sigui pràcticament nul·la al llarg del segle XXI independentment que el recurs eòlic fos baix, com al Congo o al Brasil, o alt, com a Mali.

Els objectius en format de preguntes del treball s'han respost sense dificultats i s'ha pogut estudiar i calcular la potència eòlica disponible als emplaçaments.

Per tant, segons els resultats trobats en aquest estudi sobre les nou localitzacions, es podria entendre que la influència del canvi climàtic sobre el recurs eòlic no és tant significativ pel que fa a la preparació d'un projecte de construcció d'un parc eòlic. Tot i que es deixen fronts oberts com la investigació de fenòmens extrems en cada emplaçament.

Referències

- BP (2018), BP statistical review of world, Technical report.
- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M. and Silva Santos, C. (2017), 'Potential impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections', *Renewable Energy* **101**(2017), 29–40.
- COP 21 (2015), 'Aprobación del Acuerdo de París'. París, Naciones Unidas.
- COP 3 (1997), 'Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático'. Kyoto, Naciones Unidas.
- Deloitte (2016), Un modelo energético sostenible para España en 2050. Recomendaciones de política energética para la transición, Technical report.
- ECMWF (n.d.), 'Climate Data Store'. Online; accessed 17 February 2020.
URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp!/home>
- EEA (2018), *Tracking progress towards Europe's climate and energy targets - Trends and projections in Europe 2018*, number 10.
- Fabrega, C. (2020), 'Apunts Energia Eòlica - MERSE'.
- Giusti, M. (2020), 'CMIP Global Climate Projections'. Online; accessed 4 April 2020.
URL: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/>
- IPCC (2011), *Fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático: Resumen para responsables de políticas y resumen técnico*.
- IPCC (2012), 'Glossary of terms. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation', *Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA* pp. 555–564.
- IPCC (2013), Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Technical report.
- IPCC (2014), Climate Change 2014: Synthesis Report, Technical report.
- Kamworapan, S. and Surussavadee, C. (2019), 'Evaluation of CMIP5 global climate models for simulating climatological temperature and precipitation for southeast Asia', *Advances in Meteorology* **2019**.
- McInnes, K. L., Erwin, T. A. and Bathols, J. M. (2011), 'Global Climate Model projected changes in 10 m wind speed and direction due to anthropogenic climate change', *Atmospheric Science Letters* **12**(4), 325–333.
- NOAA Research (2020), 'Global Monitoring Laboratory. Carbon Cycle Greenhouse Gases'. Online; accessed 21 June 2020.
URL: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/>
- OpenStreetMap contributors (n.d.), 'Advanced converter'. Online; accessed 30 March 2020.
URL: <https://www.advancedconverter.com/es/herramientas-de-mapa/encontrar-altitud-desde-coordenadas>
- Penmetsa, V. and Holbert, K. E. (2019), 'Climate Change Effects on Solar, Wind and Hydro Power Generation', *51st North American Power Symposium, NAPS 2019* pp. 1–6.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Pes, M. P., da Cruz Segundo, E. I. and Lyra, A. d. A. (2013), 'The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil', *Renewable Energy* **49**, 107–110.
- Rodriguez, J., Burgos, J. and Arnalte, S. (2003), *Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica*, Madrid.

- Sola, Y. (2020), 'Apunts Canvi Climàtic - MERSE'.
- Solaun, K. and Cerdá, E. (2019), 'Climate change impacts on renewable energy generation. A review of quantitative projections', *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **116**.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J. and Meehl, G. A. (2012), 'An overview of CMIP5 and the experiment design', *Bulletin of the American Meteorological Society* **93**(4), 485-498.
- UE (2009), 'Directiva 2009/28/CE del Parlament Europeu i del Consell, de 23 d'abril de 2009, relativa al foment de l'ús d'energia procedent de fonts renovables i per la que es modifiquen i es deroguen les Directives 2001/77/CE i 2003/30/CE'. Diari Oficial de la Unió Europea L 140, 23 d'abril de 2009, pp. 16-62.
- UE (2018), 'Directiva (UE) 2018/2001 del Parlament Europeu i del Consell, de 11 de desembre de 2018, relativa al foment de l'ús d'energia procedent de fonts renovables'. Diari Oficial de la Unió Europea L 328, 21 de desembre de 2018, pp. 82-209.
- UN (2019), 'Cambio Climático'. Online; accessed 25 March 2020.
URL: <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>
- UNFCCC (1992), 'Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático'. Rio de Janeiro.
- UNFCCC (2020), 'Status of Ratification of the Convention'. Online; accessed 25 March 2020.
URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-convention/status-of-ratification/status-of-ratification-of-the-convention>

Annexos

Acrònims

- CMIP → Coupled Model Intercomparison Project
- CMIP5 → Coupled Model Intercomparison Project - Phase 5
- CMNUCC → Conveni Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic
- COP → Conference of Parties
- EEA → European Environment Agency
- GEH → Gasos d'Efecte Hivernacle
- IPCC → Intergovernmental Panel on Climate Change
- OMM → Organització Meteorològica Mundial
- PIB → Producte Interior Brut
- PNUMA → Programa de Nacions Unides pel Medi Ambient
- RCP → Representative Concentration Pathways
- UE → Unió Europea
- UN → United Nations
- UNFCCC → United Nations Framework Convention on Climate Change
- WCRP → World Climate Research Program

Glossari

Algunes de les definicions d'aquest glossari s'han reinterpretat de (IPCC, 2012).

Alçada de boixa

Alçada d'un aerogenerador on hi ha situat l'eix del rotor. És el centre de l'àrea que escombren les pales.

Distribució de Weibull

Distribució de probabilitat. La seva densitat de probabilitat es regeix per mitjà de la següent funció:

$$\rho(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Efecte hivernacle

Procés de regulació de la calor que reté un planeta gràcies a la seva atmosfera que permet l'entrada de la radiació solar i dificulta la sortida de la radiació terrestre. L'atmosfera l'absorbeix i la reemet, provocant un escalfament en el sistema.

Eòlica on-shore

Eòlica construïda al continent. El seu oposat és l'eòlica off-shore, on es munten aerogeneradors en el mar.

Equilibri radiatiu

La radiació solar absorbida (radiació de longitud d'ona curta) és igual a la radiació emesa per la superfície terrestre (radiació infraroja, de longitud d'ona llarga) segons la llei del cos negre de Stefan-Boltzmann.

Forçament radiatiu

Resultat de la diferència entre la irradiància que entra per la tropopausa i la irradiància que en surt ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), aquesta diferència es causada per agents forçadors del sistema com els GEH.

Pas de malla

Distància mínima expressada en metres o kilòmetres entre dos punts de l'espai que caracteritza un model. Com menor sigui aquesta distància, més resolució espacial presenta el model.

Projecció climàtica

Conjunt de resultats que prediuen una tendència sobre el sistema climàtic. Els resultats són extrets de models climàtics sota la influència dels agents forçadors (GEH, aerosols, etc.) Les projeccions depenen directament de la presència més o menys elevada d'aquests forçadors radiatius i que, alhora depenen dels escenaris socioeconòmics i tecnològics del futur.

Recurs natural renovable

Recurs que contínuament s'està regenerant a una velocitat similar a la del seu consum. Exemples: radiació solar, vent, biomassa i aigua.

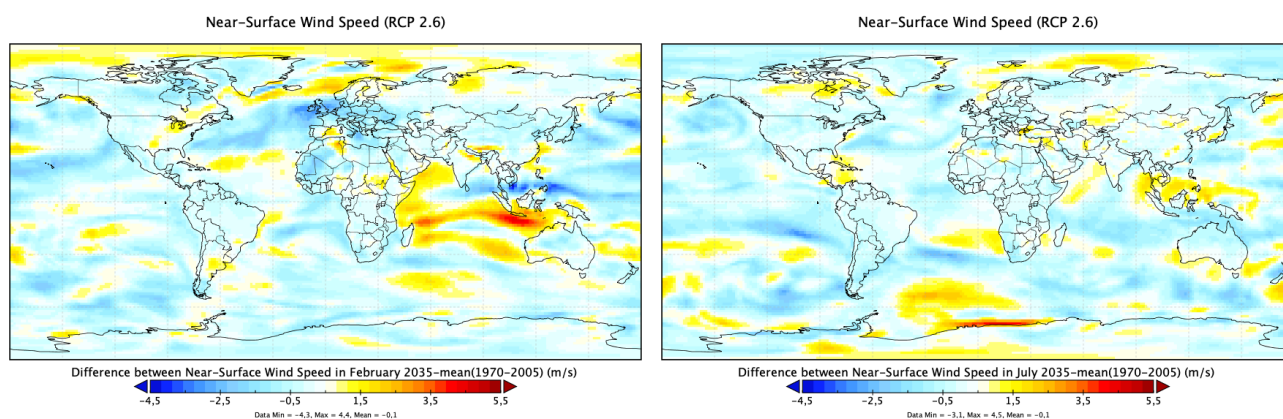
Recurs natural no renovable

Recurs format durant molts milions d'anys que estan emmagatzemats en el globus terrestre i que un cop han sigut consumits no tornen a regenerar-se. Té una tendència al seu esgotament progressiu. Exemples: carbó, petroli, gas natural i urani.

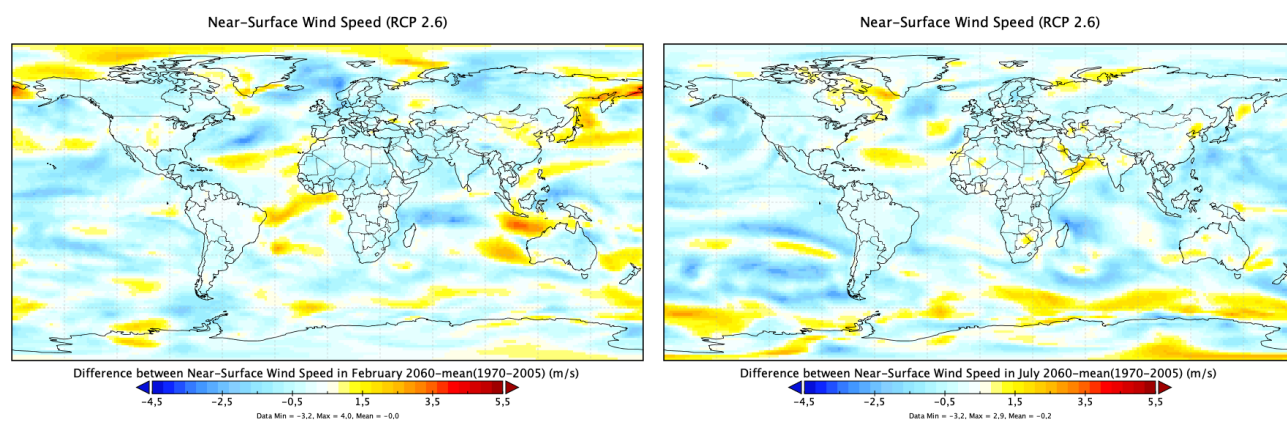
Sistema climàtic

Sistema complex format per l'atmosfera, els oceans, la litosfera, la criosfera i la biosfera i les interaccions i relacions entre tots els seus elements. Hi ha qui ja considera el sistema socioeconòmic com un component més del sistema climàtic.

Recull de resultats gràfics

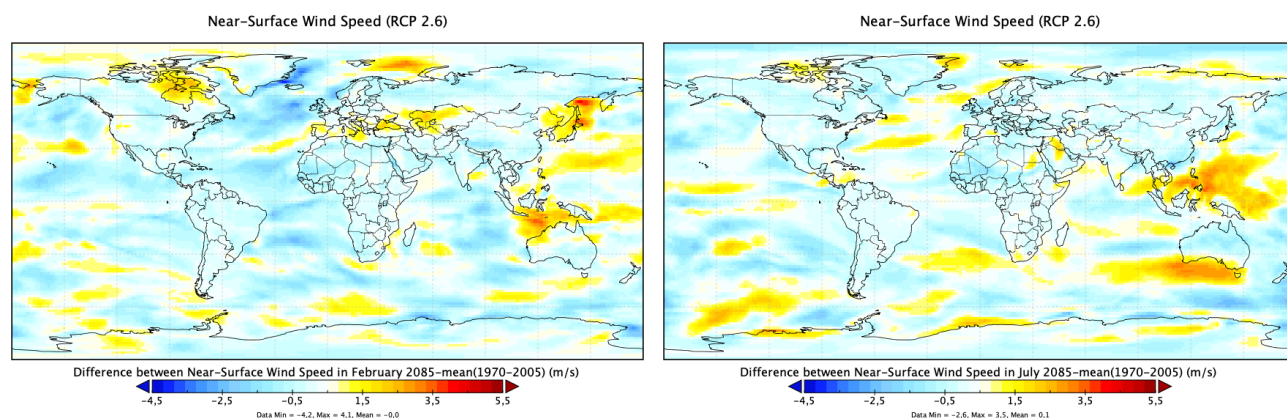


(a) Diferència del mes de febrer del 2035 i de la mitjana històrica (1970-2005). (b) Diferència del mes de juliol del 2035 i de la mitjana històrica (1970-2005).



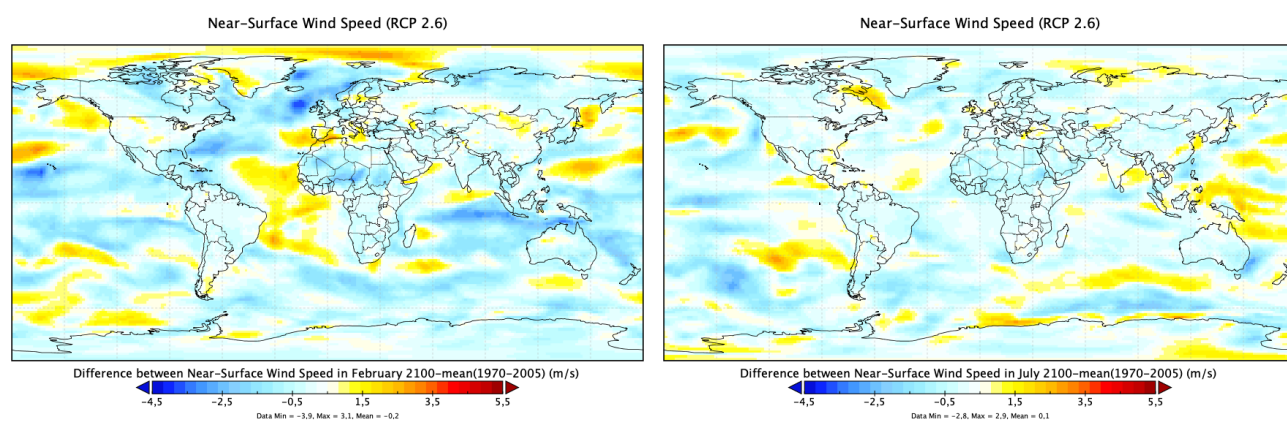
(c) Diferència del mes de febrer del 2060 i de la mitjana històrica (1970-2005).

(d) Diferència del mes de juliol del 2060 i de la mitjana històrica (1970-2005).



(e) Diferència del mes de febrer del 2085 i de la mitjana històrica (1970-2005).

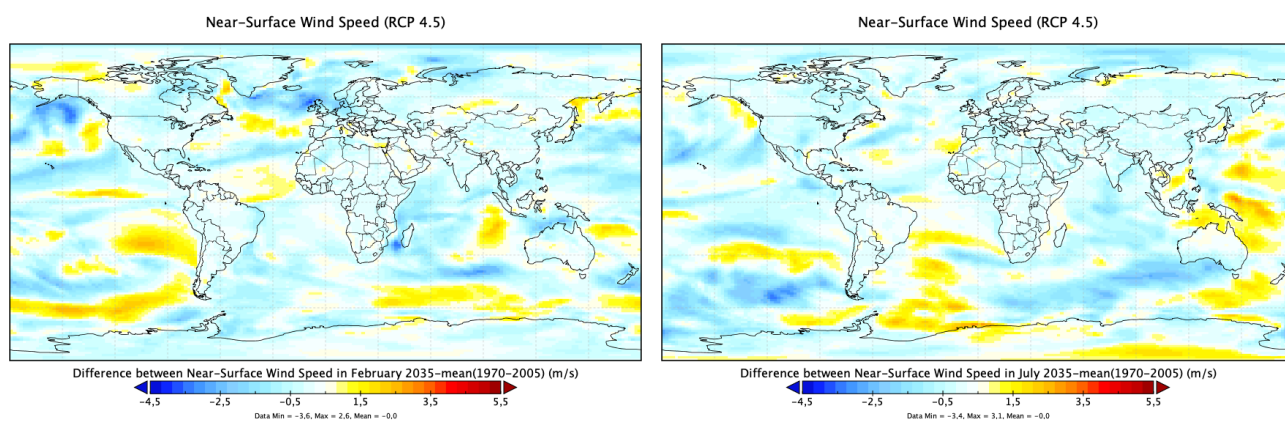
(f) Diferència del mes de juliol del 2085 i de la mitjana històrica (1970-2005).



(g) Diferència del mes de febrer del 2100 i de la mitjana històrica (1970-2005).

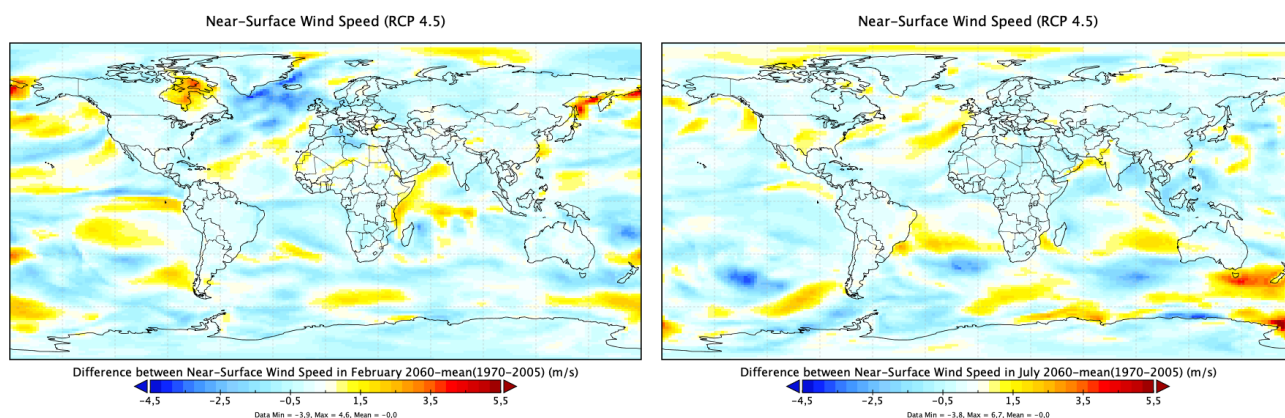
(h) Diferència del mes de juliol del 2100 i de la mitjana històrica (1970-2005).

Figura I. Representacions gràfiques globals de les diferències de les sortides de l'escenari RCP 2.6 i les simulacions històriques de velocitats de vent a 10 m en un instant determinat.



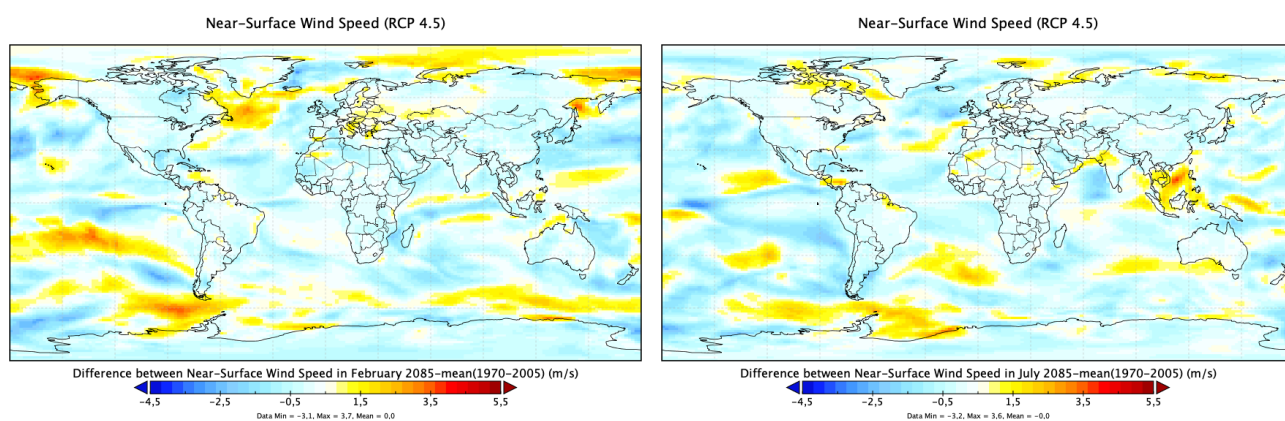
(a) Diferència del mes de febrer del 2035 i de la mitjana històrica (1970-2005).

(b) Diferència del mes de juliol del 2035 i de la mitjana històrica (1970-2005).



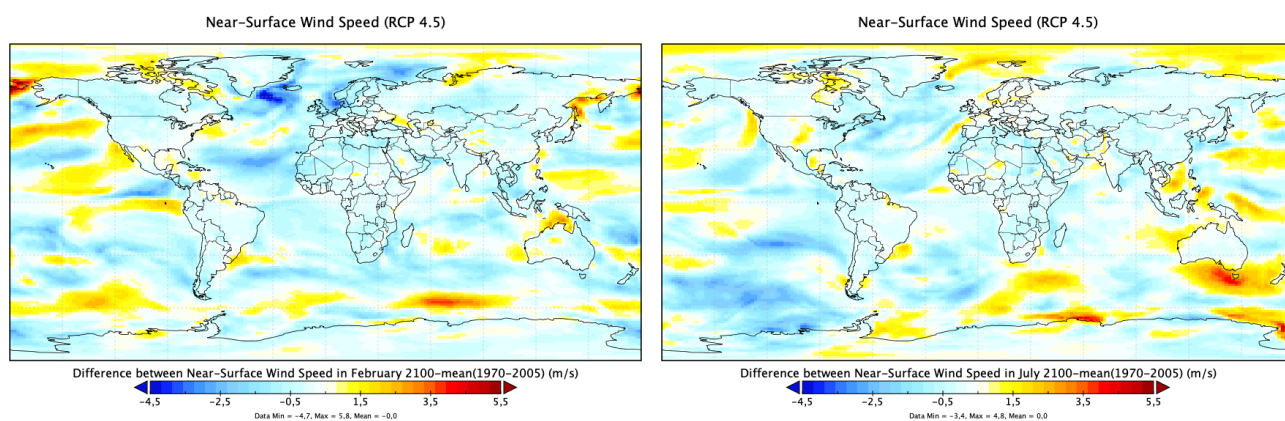
(c) Diferència del mes de febrer del 2060 i de la mitjana històrica (1970-2005).

(d) Diferència del mes de juliol del 2060 i de la mitjana històrica (1970-2005).



(e) Diferència del mes de febrer del 2085 i de la mitjana històrica (1970-2005).

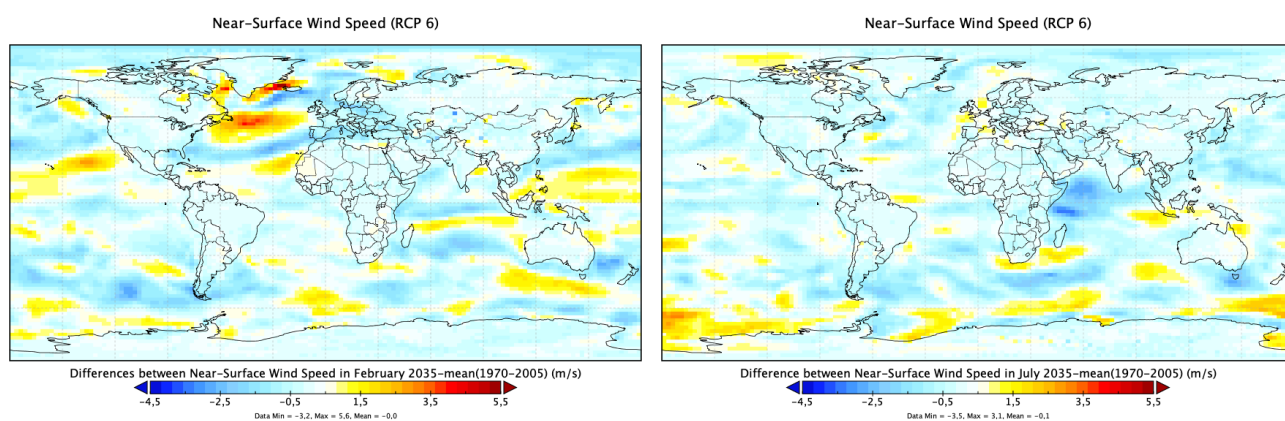
(f) Diferència del mes de juliol del 2085 i de la mitjana històrica (1970-2005).



(g) Diferència del mes de febrer del 2100 i de la mitjana històrica (1970-2005).

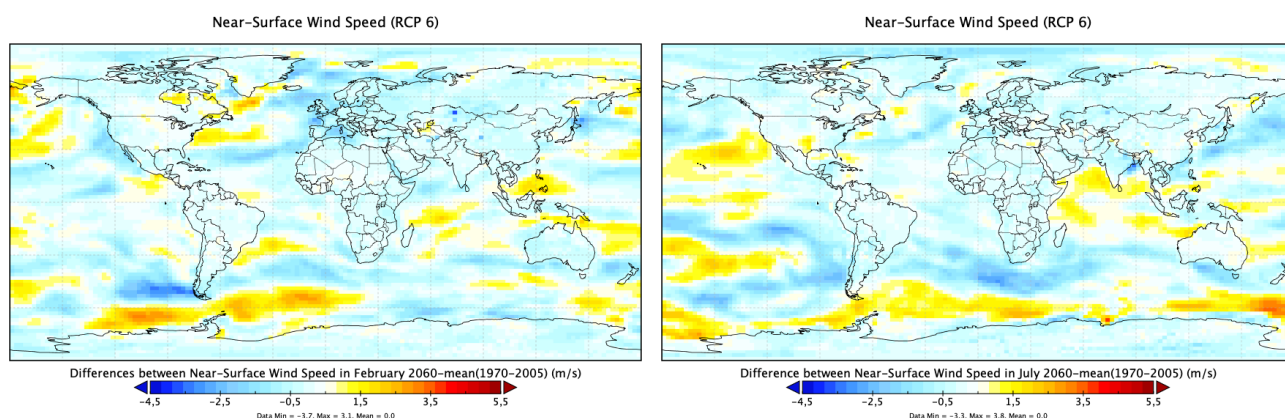
(h) Diferència del mes de juliol del 2100 i de la mitjana històrica (1970-2005).

Figura II. Representacions gràfiques globals de les diferències de les sortides de l'escenari RCP 4.5 i les simulacions històriques de velocitats de vent a 10 m en un instant determinat.



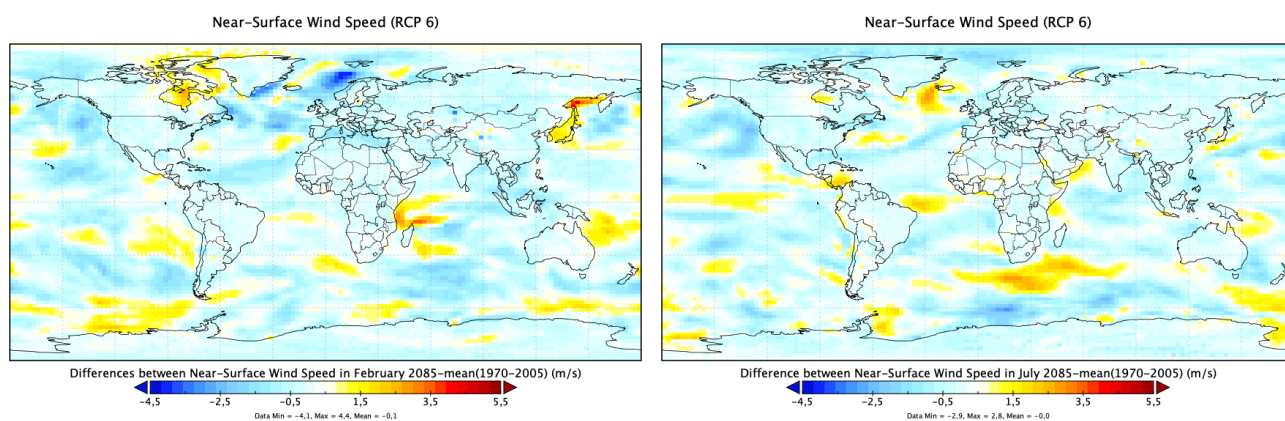
(a) Diferència del mes de febrer del 2035 i de la mitjana històrica (1970-2005).

(b) Diferència del mes de juliol del 2035 i de la mitjana històrica (1970-2005).



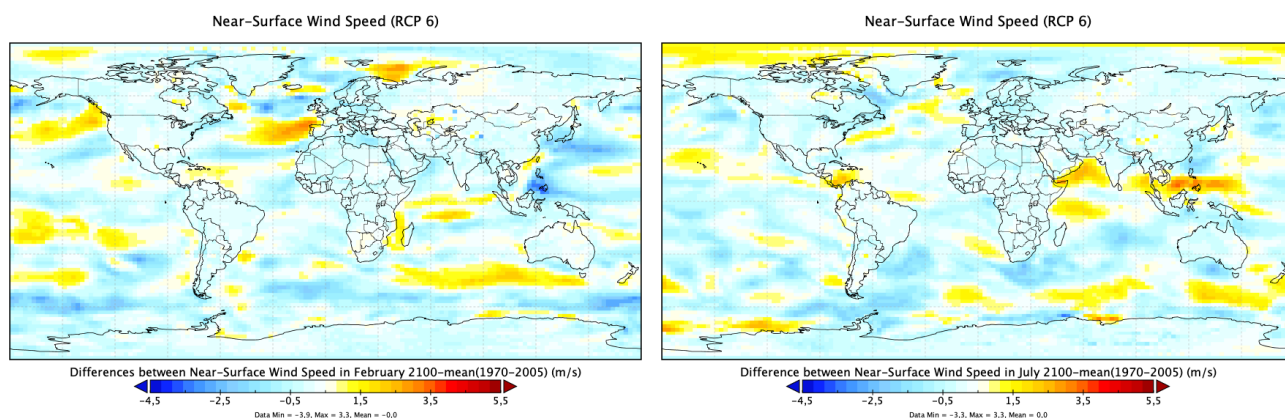
(c) Diferència del mes de febrer del 2060 i de la mitjana històrica (1970-2005).

(d) Diferència del mes de juliol del 2060 i de la mitjana històrica (1970-2005).



(e) Diferència del mes de febrer del 2085 i de la mitjana històrica (1970-2005).

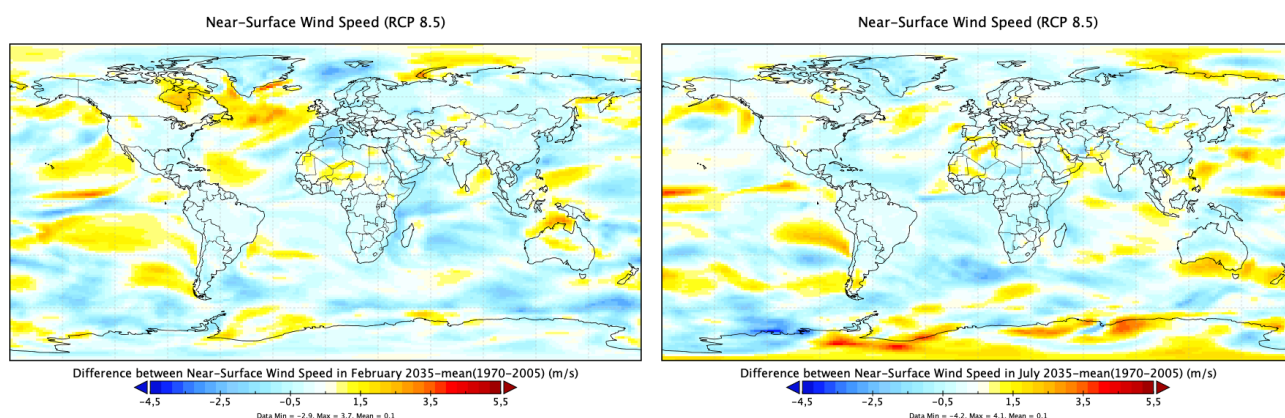
(f) Diferència del mes de juliol del 2085 i de la mitjana històrica (1970-2005).



(g) Diferència del mes de febrer del 2100 i de la mitjana històrica (1970-2005).

(h) Diferència del mes de juliol del 2100 i de la mitjana històrica (1970-2005).

Figura III. Representacions gràfiques globals de les diferències de les sortides de l'escenari RCP 6 i les simulacions històriques de velocitats de vent a 10 m en un instant determinat.



(a) Diferència del mes de febrer del 2035 i de la mitjana històrica (1970-2005).

(b) Diferència del mes de juliol del 2035 i de la mitjana històrica (1970-2005).

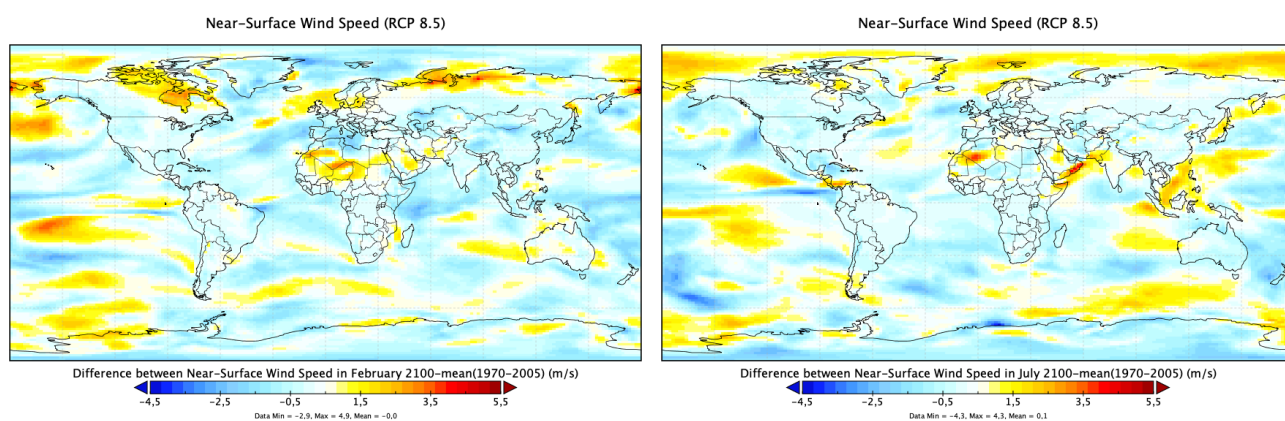
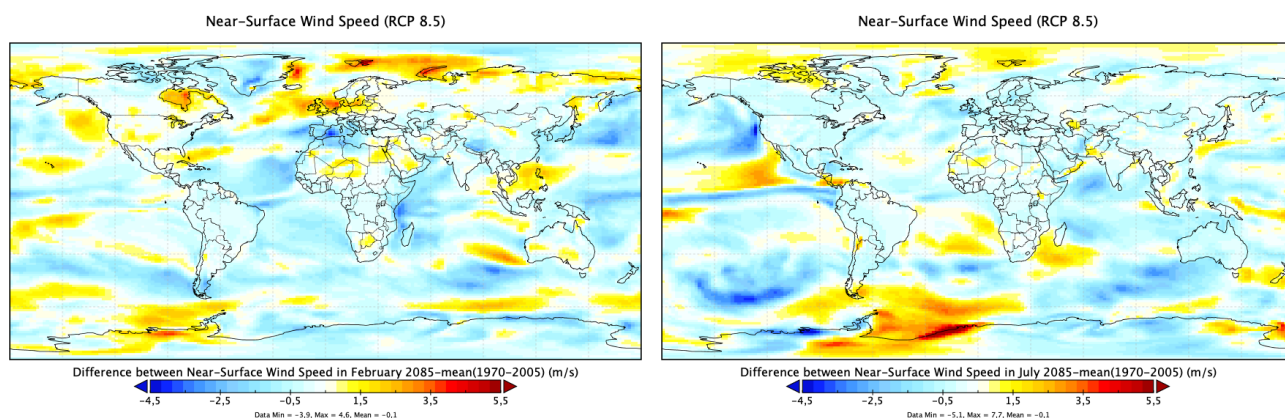
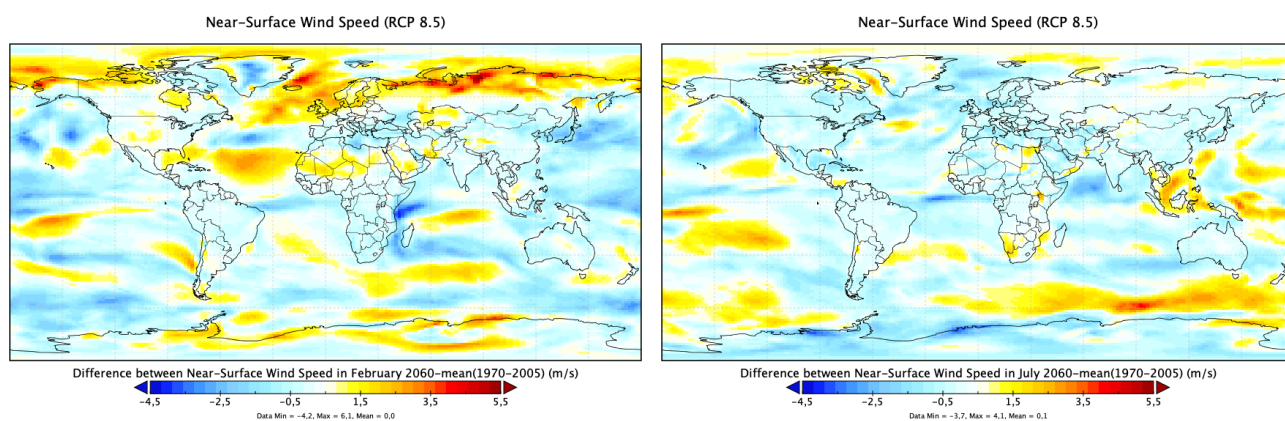


Figura IV. Representacions gràfiques globals de les diferències de les sortides de l'escenari RCP 8.5 i les simulacions històriques de velocitats de vent a 10 m en un instant determinat.

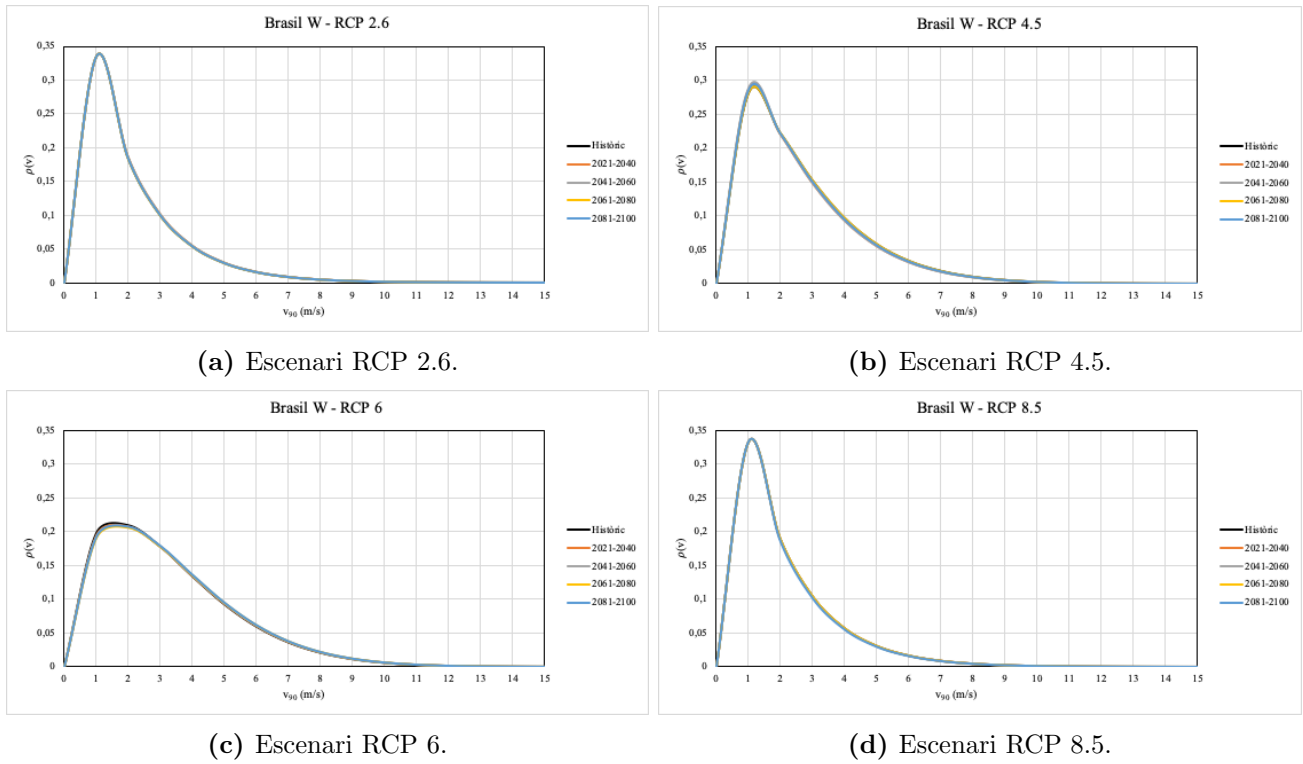


Figura V. Distribucions de probabilitat de Weibull pel Brasil i els quatre escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.

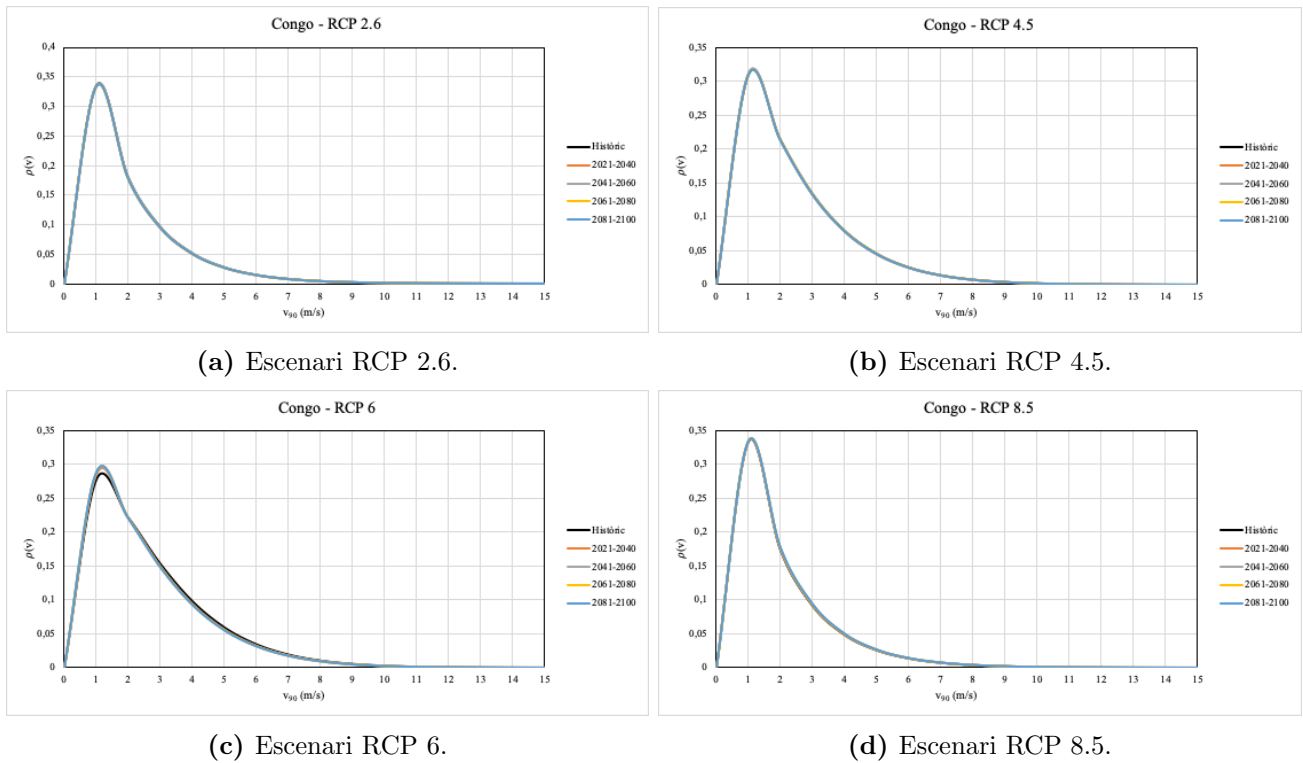


Figura VI. Distribucions de probabilitat de Weibull pel Congo i els quatre escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.

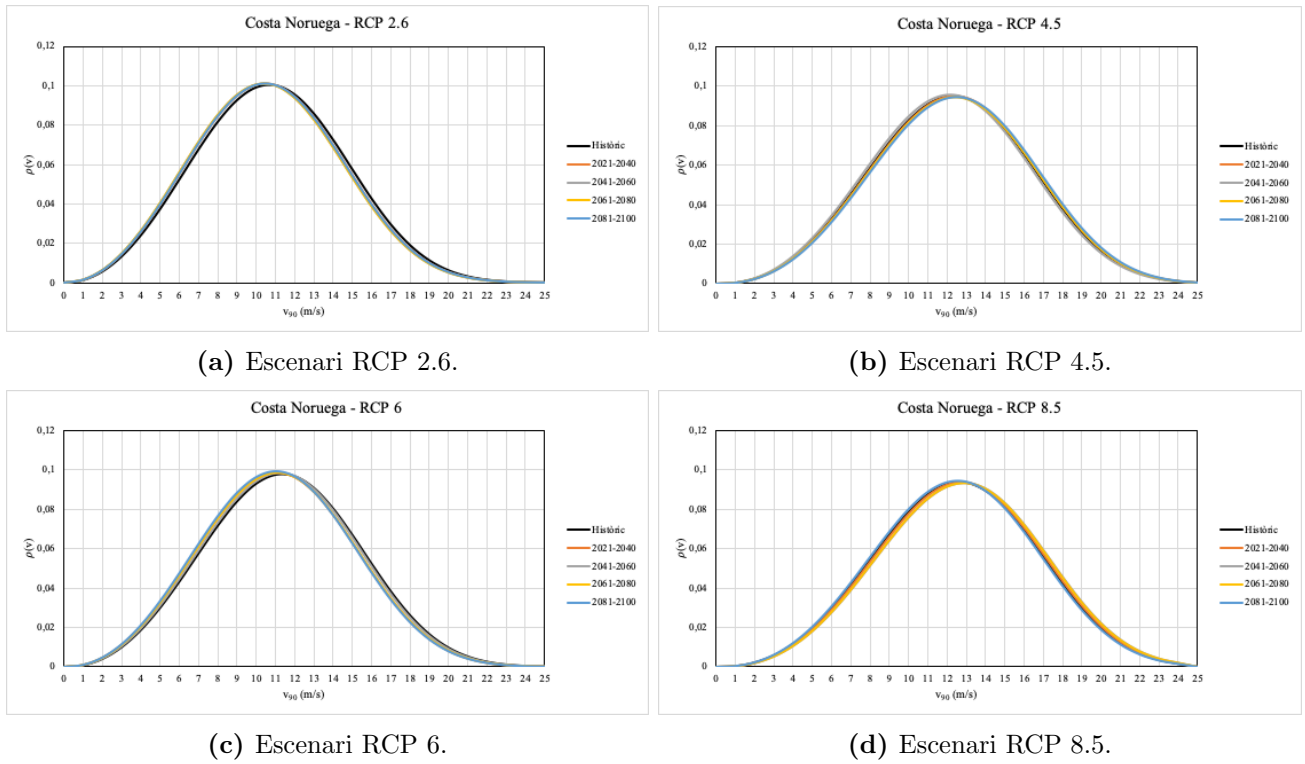


Figura VII. Distribucions de probabilitat de Weibull per la costa de Noruega i els quatre escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.

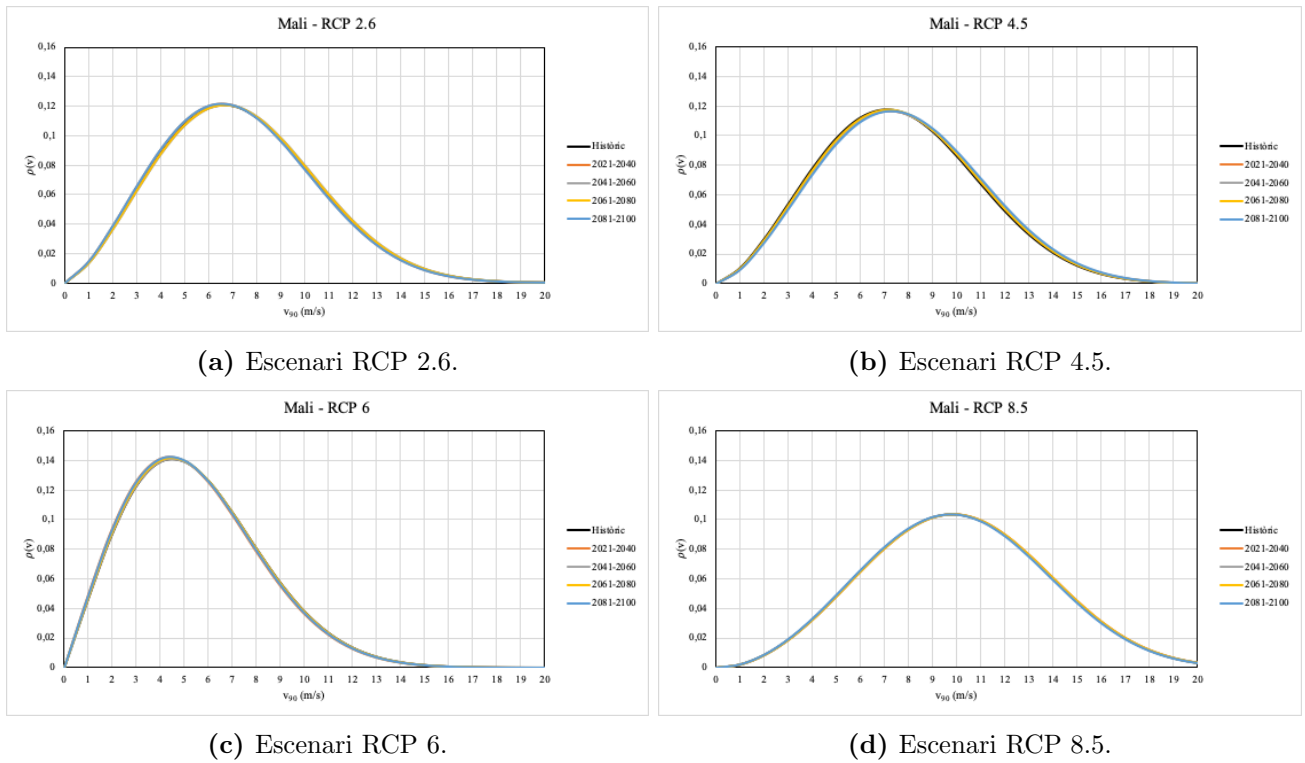


Figura VIII. Distribucions de probabilitat de Weibull pel Mali i els quatre escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.

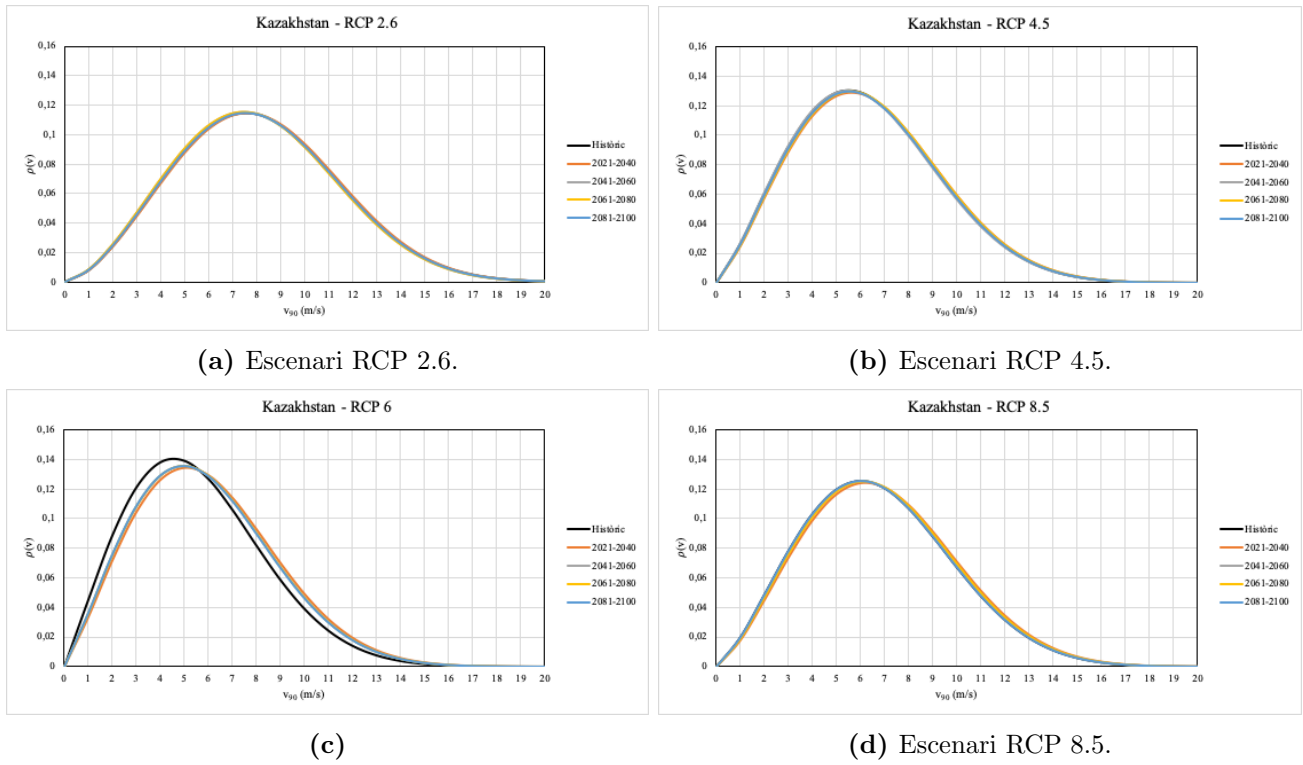


Figura IX. Distribucions de probabilitat de Weibull pel Kazakhstan i els quatre escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.

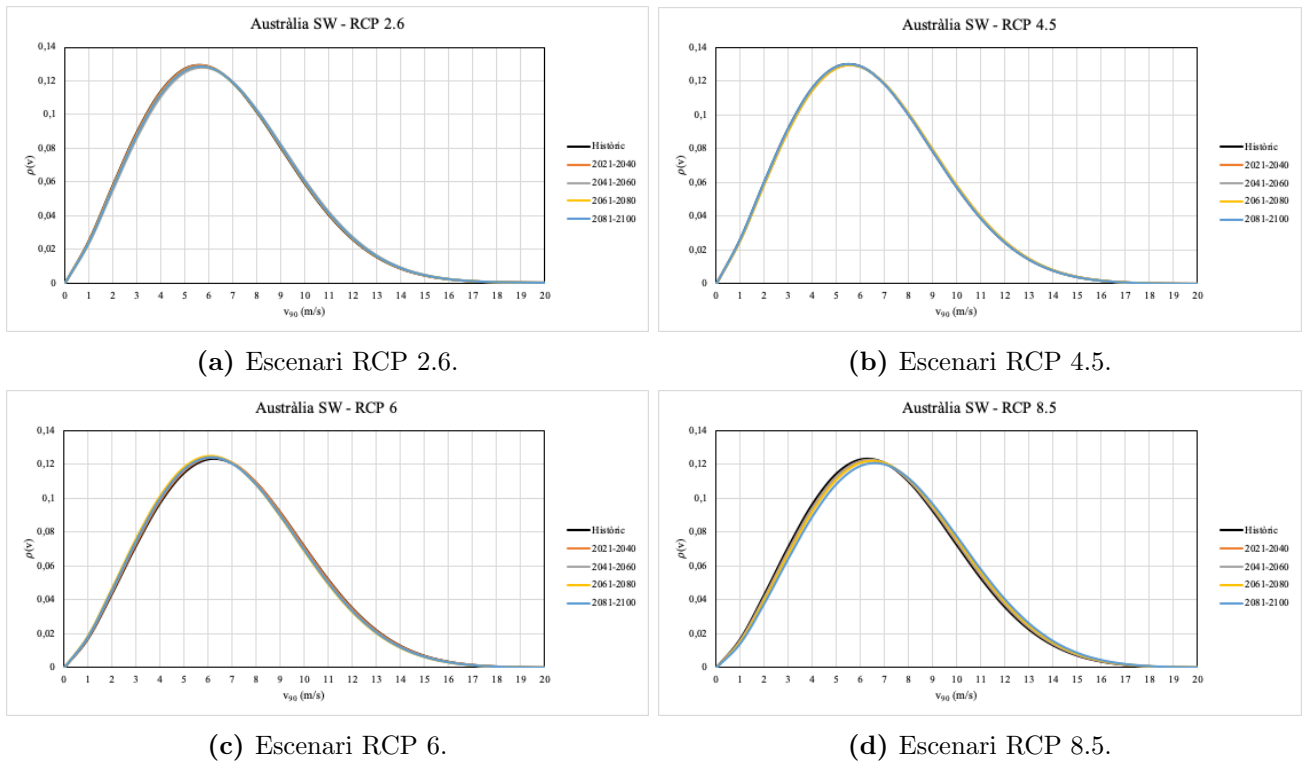


Figura X. Distribucions de probabilitat de Weibull per Austràlia i els quatre escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.

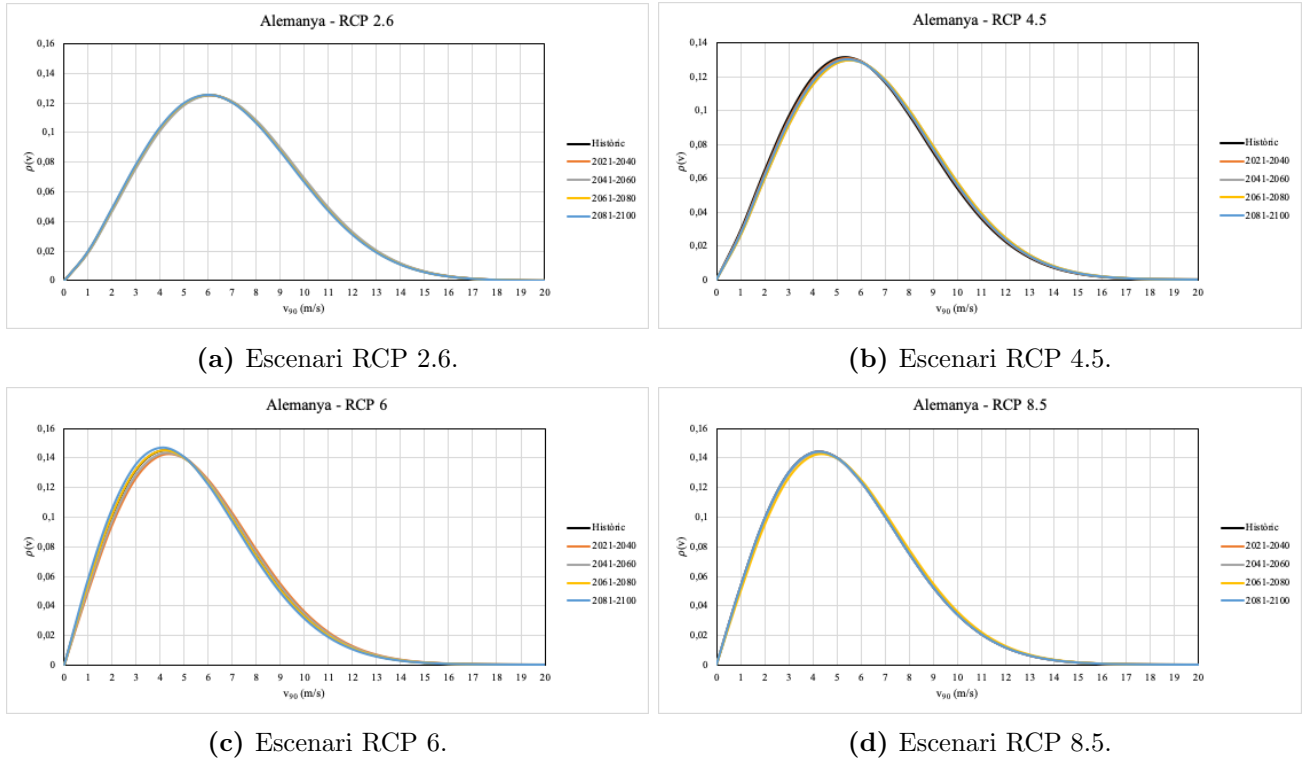


Figura XI. Distribucions de probabilitat de Weibull per Alemanya i els quatre escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.

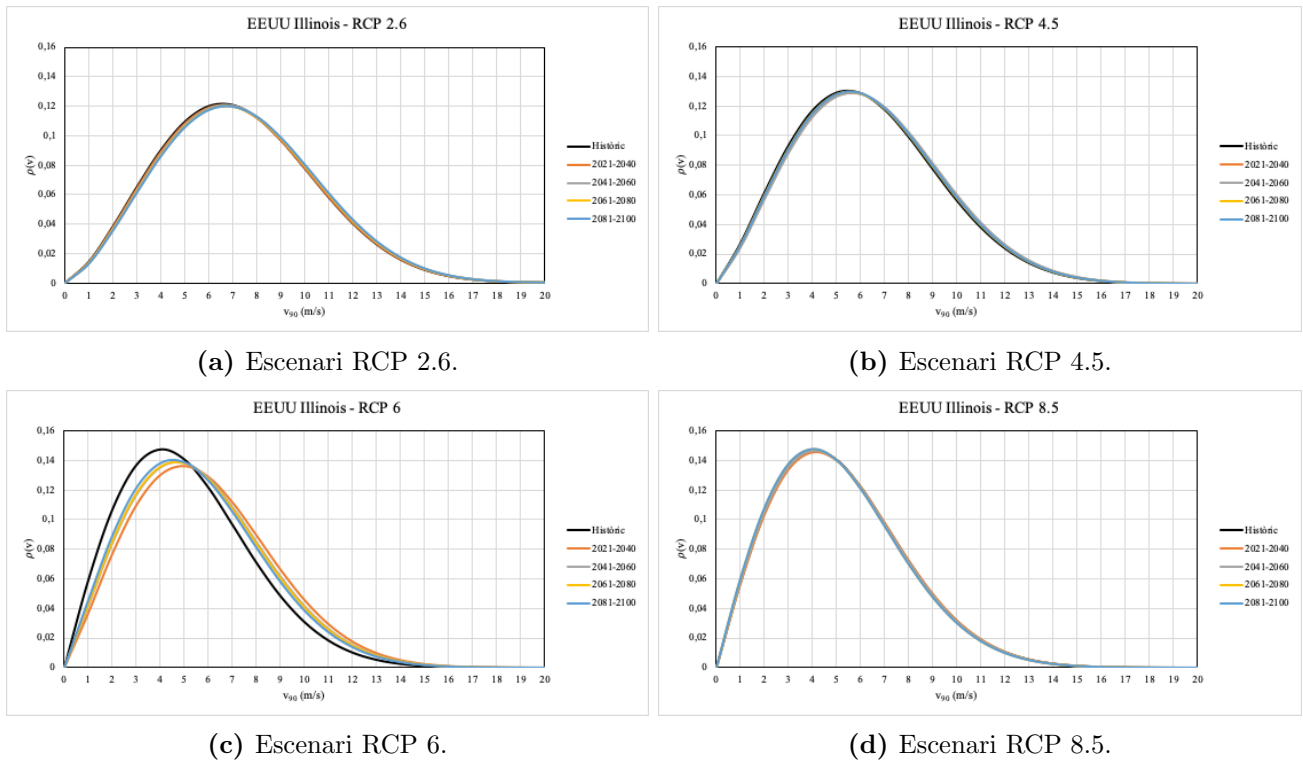


Figura XII. Distribucions de probabilitat de Weibull pels Estats Units i els quatre escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.

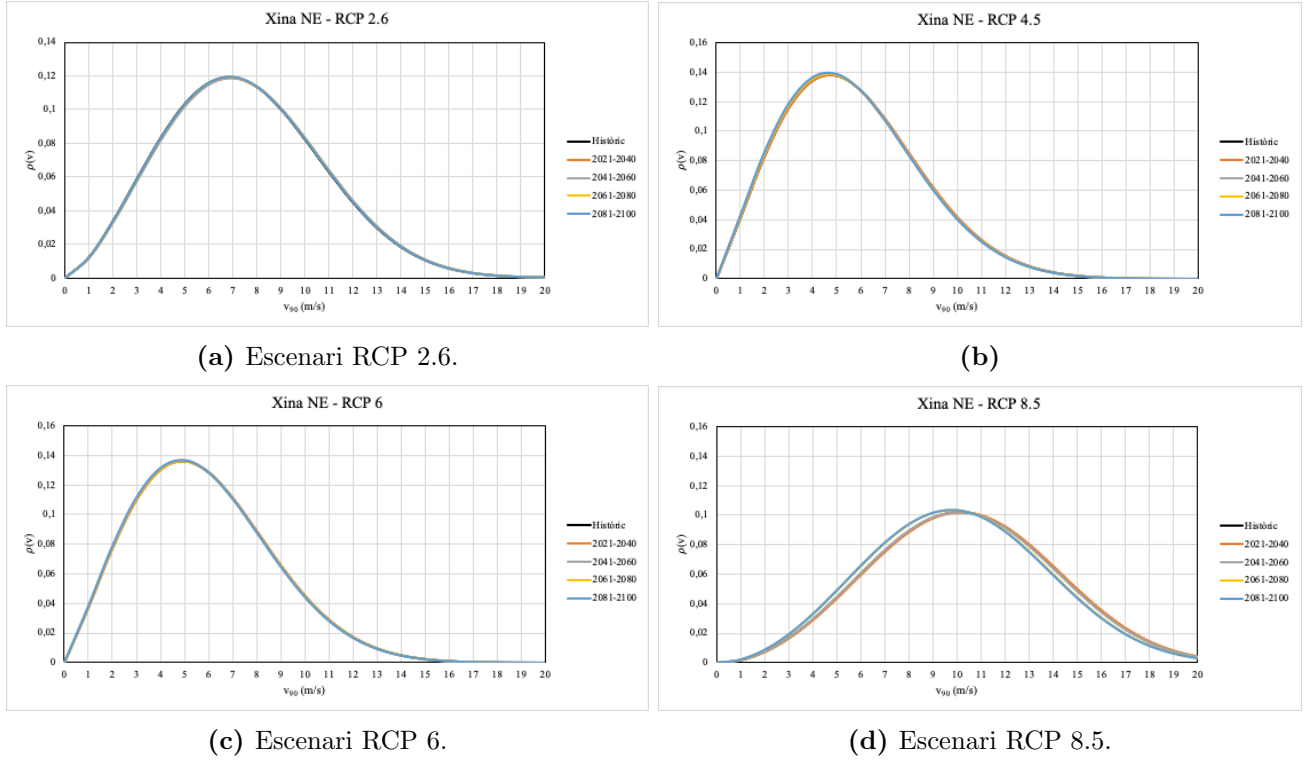


Figura XIII. Distribucions de probabilitat de Weibull per la Xina i els quatre escenaris futurs per cinc períodes: històric, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.

Taules de resultats

Taula I. Paràmetres per l'estudi del recurs eòlic dels períodes temporals per cada localització a l'escenari RCP 2.6.

RCP 2.6	Brasil					Congo					Costa Noruega				
	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
$\langle v_{10} \rangle (m \cdot s^{-1})$	0.76	0.77	0.77	0.75	0.76	0.73	0.73	0.74	0.73	0.73	7.11	6.97	6.92	6.92	6.96
k_{10}	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.80	0.80	0.81	0.80	0.80	2.51	2.48	2.47	2.47	2.48
$c_{10} (m \cdot s^{-1})$	0.68	0.69	0.69	0.68	0.68	0.65	0.64	0.65	0.64	0.64	8.01	7.85	7.80	7.80	7.85
β	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
k_{90}	1.01	1.02	1.02	1.01	1.02	1.00	0.99	1.00	0.99	0.99	3.11	3.08	3.07	3.07	3.07
$c_{90} (m \cdot s^{-1})$	1.65	1.67	1.67	1.64	1.65	1.59	1.58	1.60	1.58	1.58	12.08	11.89	11.83	11.82	11.88

	Mali					Kazakhstan					Alemanya				
	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
$\langle v_{10} \rangle (m \cdot s^{-1})$	4.40	4.34	4.43	4.42	4.34	4.98	5.02	4.93	4.92	4.97	4.04	4.04	4.08	4.02	4.01
k_{10}	1.97	1.96	1.98	1.98	1.96	2.10	2.11	2.09	2.08	2.10	1.89	1.89	1.90	1.89	1.88
$c_{10} (m \cdot s^{-1})$	4.96	4.90	5.00	4.98	4.89	5.63	5.67	5.56	5.55	5.61	4.55	4.55	4.59	4.53	4.51
β	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
k_{90}	2.44	2.43	2.45	2.45	2.43	2.60	2.61	2.59	2.58	2.60	2.34	2.34	2.35	2.34	2.33
$c_{90} (m \cdot s^{-1})$	8.21	8.12	8.26	8.24	8.11	9.08	9.13	9.00	8.99	9.06	7.66	7.65	7.71	7.63	7.60

	Austràlia					Estats Units					Xina				
	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
$\langle v_{10} \rangle (m \cdot s^{-1})$	3.77	3.78	3.84	3.80	3.81	4.36	4.38	4.43	4.44	4.46	4.53	4.57	4.57	4.56	4.55
k_{10}	1.82	1.83	1.84	1.83	1.83	1.96	1.97	1.98	1.98	1.99	2.00	2.01	2.01	2.01	2.01
$c_{10} (m \cdot s^{-1})$	4.24	4.25	4.32	4.28	4.28	4.92	4.94	5.00	5.01	5.03	5.12	5.15	5.16	5.14	5.13
β	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
k_{90}	2.26	2.27	2.28	2.27	2.27	2.43	2.44	2.45	2.46	2.46	2.48	2.49	2.49	2.49	2.49
$c_{90} (m \cdot s^{-1})$	7.23	7.25	7.34	7.28	7.29	8.15	8.18	8.26	8.27	8.30	8.41	8.46	8.47	8.45	8.44

Taula II. Paràmetres per l'estudi del recurs eòlic dels períodes temporals per cada localització a l'escenari RCP 4.5.

RCP 4.5	Brasil					Congo					Costa Noruega				
	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
$\langle v_{10} \rangle (m \cdot s^{-1})$	1.18	1.14	1.14	1.18	1.16	1.01	1.00	1.00	1.01	1.00	8.31	8.36	8.19	8.37	8.43
k_{10}	1.02	1.00	1.00	1.02	1.01	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	2.71	2.72	2.69	2.72	2.73
$c_{10} (m \cdot s^{-1})$	1.18	1.14	1.14	1.19	1.16	0.98	0.97	0.97	0.98	0.98	9.34	9.40	9.21	9.41	9.48
β	0.36	0.36	0.36	0.35	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
k_{90}	1.26	1.25	1.24	1.26	1.25	1.17	1.16	1.16	1.17	1.17	3.36	3.37	3.34	3.37	3.38
$c_{90} (m \cdot s^{-1})$	2.58	2.51	2.51	2.59	2.54	2.22	2.20	2.20	2.22	2.21	13.67	13.74	13.52	13.75	13.84

	Mali					Kazakhstan					Alemanya				
	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
$\langle v_{10} \rangle (m \cdot s^{-1})$	4.69	4.77	4.77	4.73	4.82	3.72	3.78	3.70	3.77	3.73	3.63	3.67	3.74	3.74	3.70
k_{10}	2.04	2.05	2.05	2.05	2.06	1.81	1.83	1.81	1.82	1.82	1.79	1.80	1.82	1.82	1.81
$c_{10} (m \cdot s^{-1})$	5.30	5.39	5.38	5.34	5.44	4.18	4.26	4.16	4.24	4.20	4.08	4.13	4.21	4.21	4.16
β	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.25	0.25	0.24	0.24	0.24
k_{90}	2.52	2.55	2.54	2.54	2.56	2.25	2.27	2.24	2.26	2.25	2.22	2.23	2.25	2.25	2.24
$c_{90} (m \cdot s^{-1})$	8.65	8.77	8.76	8.71	8.84	7.15	7.26	7.12	7.23	7.17	7.02	7.08	7.19	7.19	7.12

	Austràlia					Estats Units					Xina				
	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
$(v_{10})(m \cdot s^{-1})$	3.72	3.74	3.74	3.75	3.72	3.69	3.79	3.80	3.74	3.75	3.26	3.27	3.23	3.23	3.21
k_{10}	1.81	1.82	1.82	1.82	1.81	1.81	1.83	1.83	1.82	1.82	1.70	1.70	1.69	1.69	1.68
$c_{10}(m \cdot s^{-1})$	4.18	4.21	4.21	4.21	4.18	4.15	4.26	4.28	4.21	4.22	3.65	3.66	3.62	3.62	3.60
β	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
k_{90}	2.25	2.25	2.25	2.26	2.25	2.24	2.27	2.27	2.25	2.26	2.10	2.11	2.09	2.09	2.09
$c_{90}(m \cdot s^{-1})$	7.15	7.19	7.19	7.20	7.15	7.11	7.26	7.28	7.18	7.20	6.41	6.42	6.36	6.36	6.33

Taula III. Paràmetres per l'estudi del recurs eòlic dels períodes temporals per cada localització a l'escenari RCP 6.

RCP 6	Brasil					Congo					Costa Noruega				
	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
$(v_{10})(m \cdot s^{-1})$	1.63	1.64	1.65	1.66	1.66	1.19	1.15	1.14	1.14	1.14	7.60	7.40	7.53	7.41	7.36
k_{10}	1.20	1.20	1.21	1.21	1.21	1.03	1.01	1.00	1.00	1.00	2.59	2.56	2.58	2.56	2.55
$c_{10}(m \cdot s^{-1})$	1.73	1.75	1.76	1.77	1.77	1.20	1.16	1.14	1.14	1.14	8.56	8.33	8.48	8.35	8.30
β	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.35	0.36	0.36	0.36	0.36	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
k_{90}	1.49	1.49	1.50	1.50	1.50	1.27	1.25	1.25	1.24	1.24	3.21	3.17	3.20	3.17	3.16
$c_{90}(m \cdot s^{-1})$	3.50	3.53	3.55	3.57	3.57	2.62	2.54	2.51	2.51	2.50	12.74	12.47	12.64	12.48	12.42

	Mali					Kazakhstan					Alemanya				
	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
$(v_{10})(m \cdot s^{-1})$	3.13	3.08	3.13	3.12	3.09	3.17	3.48	3.40	3.40	3.39	2.97	3.06	3.02	2.95	2.90
k_{10}	1.66	1.65	1.66	1.66	1.65	1.67	1.75	1.73	1.73	1.73	1.62	1.64	1.63	1.62	1.60
$c_{10}(m \cdot s^{-1})$	3.51	3.44	3.50	3.49	3.46	3.55	3.90	3.82	3.82	3.81	3.31	3.42	3.37	3.30	3.24
β	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.25	0.25	0.25	0.26	0.26	0.26	0.26	0.27
k_{90}	2.06	2.04	2.06	2.06	2.05	2.07	2.17	2.15	2.15	2.15	2.01	2.04	2.02	2.00	1.99
$c_{90}(m \cdot s^{-1})$	6.20	6.11	6.19	6.18	6.13	6.26	6.76	6.64	6.64	6.63	5.92	6.08	6.01	5.90	5.82

	Austràlia					Estats Units					Xina				
	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
$(v_{10})(m \cdot s^{-1})$	4.17	4.14	4.10	4.07	4.10	2.89	3.37	3.25	3.22	3.15	3.37	3.37	3.35	3.36	3.34
k_{10}	1.92	1.91	1.90	1.90	1.90	1.60	1.73	1.69	1.69	1.67	1.72	1.73	1.72	1.72	1.72
$c_{10}(m \cdot s^{-1})$	4.70	4.67	4.62	4.59	4.62	3.22	3.79	3.64	3.61	3.53	3.78	3.79	3.75	3.77	3.75
β	0.23	0.23	0.24	0.24	0.24	0.27	0.25	0.26	0.26	0.26	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
k_{90}	2.38	2.37	2.36	2.35	2.36	1.98	2.14	2.10	2.09	2.07	2.14	2.14	2.13	2.14	2.13
$c_{90}(m \cdot s^{-1})$	7.85	7.82	7.75	7.70	7.75	5.80	6.60	6.39	6.35	6.24	6.59	6.60	6.55	6.57	6.54

Taula IV. Paràmetres per l'estudi del recurs eòlic dels períodes temporals per cada localització a l'escenari RCP 8.5.

RCP 8.5	Brasil					Congo					Costa Noruega				
	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
$(v_{10})(m \cdot s^{-1})$	0.79	0.79	0.79	0.79	0.78	0.71	0.71	0.72	0.72	0.72	8.55	8.62	8.74	8.72	8.48
k_{10}	0.84	0.83	0.84	0.84	0.83	0.79	0.79	0.80	0.80	0.80	2.75	2.76	2.78	2.78	2.74
c_{10}	0.72	0.72	0.72	0.72	0.70	0.62	0.63	0.63	0.63	0.64	9.61	9.68	9.82	9.80	9.53
β	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
k_{90}	1.04	1.03	1.04	1.04	1.03	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	3.41	3.42	3.44	3.44	3.39
c_{90}	1.73	1.72	1.73	1.73	1.69	1.53	1.55	1.56	1.56	1.57	13.99	14.07	14.23	14.21	13.89

	Mali					Kazakhstan					Alemanya				
	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
$(v_{10})(m \cdot s^{-1})$	6.50	6.53	6.51	6.52	6.47	4.03	4.14	4.06	4.09	4.03	3.01	3.01	3.02	3.07	3.01
k_{10}	2.40	2.40	2.40	2.40	2.39	1.89	1.91	1.89	1.90	1.89	1.63	1.63	1.63	1.65	1.63
c_{10}	7.33	7.37	7.34	7.36	7.30	4.53	4.67	4.58	4.60	4.54	3.36	3.36	3.37	3.44	3.36
β	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.24	0.23	0.24	0.24	0.24	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
k_{90}	2.97	2.98	2.97	2.98	2.96	2.34	2.37	2.35	2.36	2.34	2.02	2.02	2.02	2.04	2.02
c_{90}	11.25	11.29	11.26	11.28	11.21	7.63	7.81	7.69	7.73	7.63	5.99	6.00	6.01	6.10	5.99

	Austràlia					Estats Units					Xina				
	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Històric	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
$(v_{10})(m \cdot s^{-1})$	4.19	4.25	4.25	4.31	4.37	2.92	2.93	2.91	2.87	2.87	6.73	6.77	6.70	6.51	6.48
k_{10}	1.92	1.94	1.94	1.95	1.97	1.61	1.61	1.60	1.59	1.59	2.44	2.45	2.43	2.40	2.39
c_{10}	4.73	4.79	4.80	4.86	4.93	3.25	3.27	3.24	3.20	3.20	7.58	7.64	7.56	7.34	7.31
β	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
k_{90}	2.39	2.40	2.40	2.42	2.44	1.99	2.00	1.99	1.97	1.97	3.02	3.03	3.02	2.97	2.97
c_{90}	7.89	7.98	7.99	8.07	8.17	5.84	5.87	5.82	5.76	5.76	11.56	11.62	11.53	11.25	11.22

Taula V. Variació de la velocitat del vent a 90 m d'altura entre els períodes de 20 anys del segle XXI i el període històric (1970-2005).

	Variació temporal (v_{90}) (%)											
	Brasil				Congo				Costa Noruega			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
(2021-2040)-Històric	1.11	-2.41	0.83	-0.37	-0.85	-0.82	-2.80	0.62	-1.63	0.50	-2.17	0.65
(2041-2060)-Històric	0.77	-2.63	1.30	-0.14	0.20	-1.00	-3.59	1.14	-2.16	-1.15	-0.80	1.81
(2061-2080)-Històric	-0.43	0.15	1.89	0.09	-0.90	0.04	-3.68	1.34	-2.20	0.58	-2.06	1.62
(2081-2100)-Històric	0.05	-1.40	1.74	-1.85	-0.75	-0.39	-3.92	1.96	-1.70	1.24	-2.55	-0.71

	Mali				Kazakhstan				Alemanya			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
(2021-2040)-Històric	-1.08	1.43	-1.50	0.38	0.57	1.51	8.06	2.34	-0.11	0.94	2.66	0.05
(2041-2060)-Històric	0.64	1.29	-0.17	0.14	-0.95	-0.41	6.11	0.76	0.71	2.48	1.46	0.25
(2061-2080)-Històric	0.33	0.75	-0.35	0.27	-1.07	1.15	6.12	1.26	-0.40	2.46	-0.34	1.78
(2081-2100)-Històric	-1.19	2.21	-1.11	-0.37	-0.24	0.33	5.86	0.03	-0.73	1.42	-1.82	-0.03

	Austràlia				Estats Units				Xina			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
(2021-2040)-Històric	0.29	0.60	-0.44	1.10	0.40	2.15	13.70	0.46	0.61	0.20	0.17	0.58
(2041-2060)-Històric	1.52	0.61	-1.33	1.24	1.38	2.45	10.08	-0.27	0.69	-0.71	-0.50	-0.26
(2061-2080)-Històric	0.76	0.66	-1.90	2.25	1.55	1.05	9.43	-1.29	0.42	-0.76	-0.21	-2.69
(2081-2100)-Històric	0.86	-0.04	-1.35	3.56	1.92	1.30	7.49	-1.32	0.30	-1.16	-0.63	-2.96

Taula VI. Potències disponibles per unitat d'àrea per cada emplaçament escollit, per cada escenari RCP i cada període temporal.

	$\langle P_d \rangle / A (W \cdot m^{-2})$											
	Brasil				Congo				Costa Noruega			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
Històric	14.63	28.60	50.00	15.55	13.14	21.04	27.54	12.52	1083.20	1528.84	1255.07	1629.48
2021-2040	14.89	27.30	50.88	15.46	12.96	20.72	26.08	12.65	1036.51	1549.88	1183.24	1658.43
2041-2060	14.81	27.18	51.39	15.51	13.18	20.66	25.68	12.75	1021.76	1481.42	1228.20	1710.86
2061-2080	14.53	28.68	52.03	15.57	12.95	21.05	25.64	12.79	1020.68	1552.97	1186.61	1702.15
2081-2100	14.64	27.84	51.86	15.09	12.98	20.89	25.51	12.91	1034.61	1580.78	1170.80	1598.20

	Mali				Kazakhstan				Alemanya			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
Històric	346.56	396.82	172.11	799.92	502.20	271.49	195.77	320.25	318.38	255.38	169.23	174.03
2021-2040	337.11	411.60	165.94	807.99	509.66	281.83	236.64	339.48	317.49	261.38	180.28	174.22
2041-2060	352.25	410.08	171.42	802.83	489.95	268.73	226.28	326.42	324.08	271.38	175.24	175.09
2061-2080	349.47	404.55	170.64	805.74	488.45	279.34	226.33	330.49	315.17	271.25	167.85	181.61
2081-2100	336.16	419.72	167.53	792.00	499.08	273.75	224.98	320.45	312.53	264.51	161.95	173.88

	Austràlia				Estats Units				Xina			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
Històric	259.92	252.85	320.57	324.61	366.19	259.22	157.94	160.68	358.93	181.17	193.62	838.00
2021-2040	261.82	256.66	317.03	333.73	369.95	273.30	215.59	162.47	364.52	182.06	194.46	851.12
2041-2060	269.89	256.72	309.89	334.89	379.19	275.35	199.20	159.63	365.29	178.04	191.24	832.22
2061-2080	264.87	257.02	305.44	343.48	380.85	266.02	196.31	155.77	362.77	177.85	192.65	779.28
2081-2100	265.54	252.61	309.76	354.74	384.39	267.68	187.98	155.64	361.72	176.09	190.66	773.52